



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：鄂尔多斯西缘复杂构造带奥陶系克里摩里组白云岩成因探讨

作者：马占荣，李振宏，刘建平，胡爱平，寇琳琳

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025031

投稿时间：2025-03-25

录用时间：2026-01-16

预出版时间：2026-01-16

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

鄂尔多斯西缘复杂构造带奥陶系克里摩里组白云岩成因探讨

马占荣¹, 李振宏^{2,3*}, 刘建平¹, 胡爱平¹, 寇琳琳^{2,3}

MA Zhanrong¹, LI Zhenhong^{2,3*}, LIU Jianping¹, HU JAiping¹, KOU Linlin^{2,3}

1. 中国石油长庆油田分公司勘探事业部, 陕西 西安 710018

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081

1. Exploration Department of Changqing Oilfield Branch, PetroChina, Xi'an, Shaanxi, 710018

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

Discussion on the Origin of the Ordovician Kelimolli Formation Dolomite in the Complex Tectonic Zone of the Western Margin of Ordos Basin

Abstract: [Objective] The dolomite of Ordos basin west margin complex tectonic belt Ordovician Kelimolli Formation as a high quality reservoir for natural gas exploration, its genesis mechanism and the relationship between sedimentary environment and tectonic superimposed transformation, there are still many disputes, which restricts the guidance of oil and gas exploration. [Methods] Based on comprehensive test and analysis including thin-section identification, cathodoluminescence, carbon-oxygen isotope, X-ray diffraction order, geochemical rare earth and trace elements, and strontium isotope, combined with the regional tectonic evolution process, this study explores the genetic mechanism of dolomite. [Results] Cathodoluminescence overall exhibits a relatively weak dark brown coloration with distinct ring bands, and authigenic quartz and saddle-shaped dolomite as hydrothermal minerals are visible, characterized by features of multi-stage recrystallization and burial origin. Carbon and oxygen isotope characteristics indicate that the dolomite has a burial origin. The overall order of the dolomite shows a relatively low degree, and the higher the temperature, the lower the order, suggesting that the dolomite formed in an environment with relatively high temperature and rapid crystallization rate. The rare earth element partitioning pattern is characterized by positive Ce and positive Eu anomalies, indicating that the formation process of dolomite is the result of internal fluid adjustment and redistribution within the diagenetic system under relatively closed, high-temperature, and high-pressure conditions. The lower the Sr content and the higher the Fe and Mn element contents, overall showing the characteristics of multi-stage superimposed modification under deep burial conditions. The strontium isotope values of medium to coarse-grained dolomite are significantly close to the average value of crustal source strontium isotopes, which may have been affected by crustal source strontium carried by synchronous tectonic activities. [Conclusion] Research indicates that dolomite formation is primarily attributed to deep burial, while also undergoing superimposed tectonic fluid modification. The evolution of Ordovician Krimolli Formation dolomite is closely linked to the deep fault system. During the co-deposition period, this fault system controlled the development of high-energy terraces. In the subsequent tectonic activity phase, the deep fault system became a fluid migration channel, facilitating the superimposed modification of dolomite bodies. [Significance] Research results can provide a fundamental support for the efficient exploration of oil and gas resources. **Key words:** Dolomite; deep burial of origin; tectonic hydrothermal genesis; Kelimoli Group; Ordovician; The western margin of the Ordos Basin

摘要: 鄂尔多斯盆地西缘复杂构造带奥陶系克里摩里组白云岩作为天然气勘探的优质储层, 其成因机制与沉积环境、构造多期叠加改造之间的关系, 仍存在着争议。以薄片鉴定、阴极发光、碳氧同位素、X射线衍射有序度、地球化学元素及锶同位素综合测试分析为基础, 结合区域构造演化过程, 探讨白云岩的成因机制。阴极发光整体表现出较弱的暗褐色, 环带明显, 可见热液矿物自生石英和马鞍状白云石, 具有多期重结晶埋藏成因的特征。碳氧同位素特征表征白云岩具有埋藏成因。白云岩有序度总体显示出不太高的特点, 并且温度越高, 有序度越低, 说明白云岩是在较高温度, 结晶速度较快的环境下形成的。稀土元素配分模式具有正 Ce、正 Eu 异常的特点, 表明白云岩形成过程是在相对封闭, 较高的温度和压力条件下, 成岩系统内部流体相互调整和再分配的结果。微量元素 Sr 含量越低, Fe 和 Mn 元素含量越高, 总体上表现出深埋藏条件下的多期叠加改造的特征。中粗晶白云岩锶同位素值明显接近于壳源锶同位素的平均值, 可能受到了同期构造携带的壳源锶的影响。研究认为白云岩的成因以深埋藏成因为主体, 同时又受到了构造热流体的叠加改造。奥陶系克里摩里组白云岩的形成演化与深部断裂体系紧密相关, 同沉积期深部断裂体系控制了高能滩的发育, 后期构造活动期, 深部断裂体系成为流体运移的通道, 促进了白云岩体的叠加改造。研究成果可以为油气资源的高效勘探提供基础支撑。

¹基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: U2244220; 41972119); 中国石油长庆油田重大科技专项(编号: 2023DZZ02); 中国石油长庆油田科研生产项目(编号: 2024-5413)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No.U2244220; 41972119), Major Science and Technology Special Project of Changqing Oilfield, China National Petroleum Corporation (No.2023DZZ02)and China National Petroleum Changqing Oilfield Branch Scientific Research and Production Project (No.2024-5413).

第一作者: 马占荣(1979-), 男, 高级工程师, 从事油田勘探生产研究工作。Email: mazr_cq@petrochina.com.cn

通信作者: 李振宏(1973-), 男, 研究员, 从事区域地质调查及油气综合研究工作。Email: lizhenhong@126.com

关键词: 白云岩; 深埋藏成因; 构造热液成因; 克里摩里组; 奥陶系; 鄂尔多斯盆地西缘
中图分类号: P588.24+6 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025031

0 引言

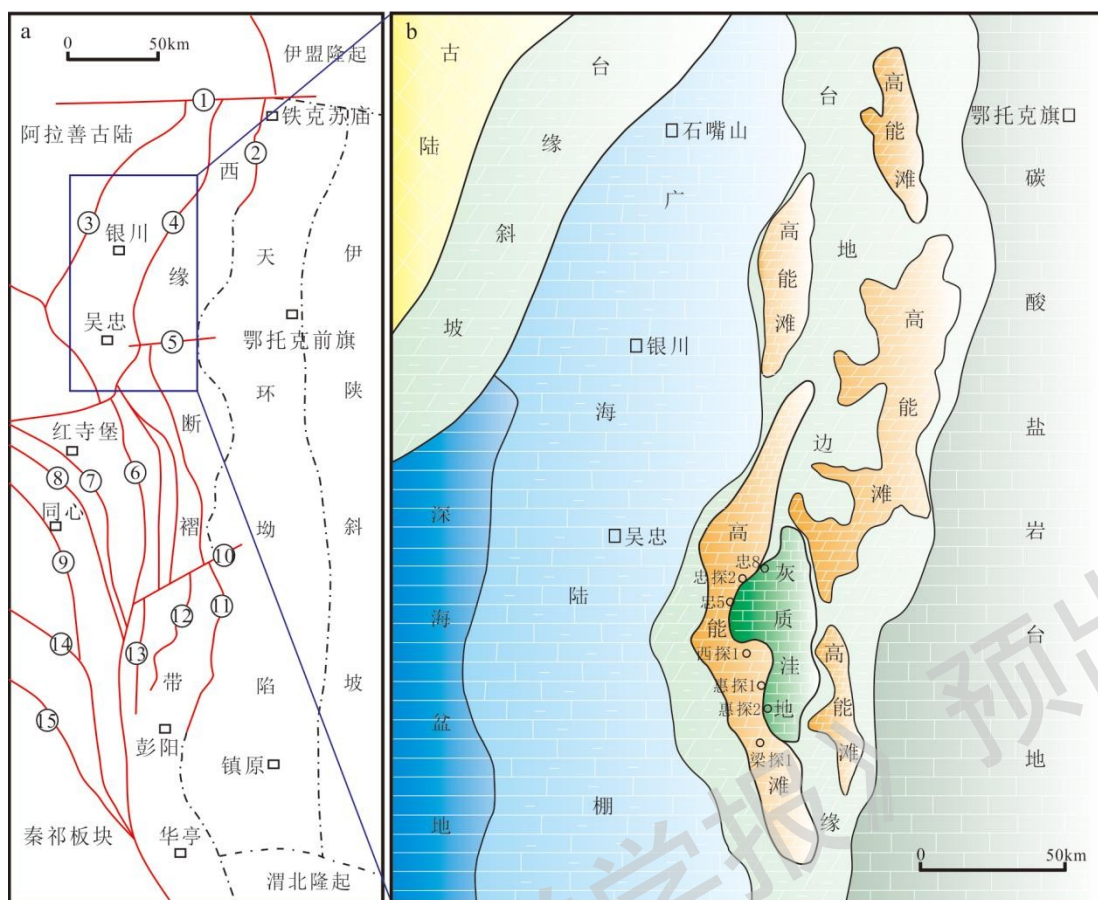
鄂尔多斯盆地作为我国重要的含油气盆地之一, 其下古生界奥陶系蕴含着丰富的天然气资源(席胜利等, 2024)。白云岩作为奥陶系地层中重要的岩石类型, 对其成因的研究不仅有助于深入理解盆地的地质演化过程, 还对油气勘探和开发具有重要的指导意义(包洪平等, 2017; 吴宇婷等, 2024)。近年来, 随着盆地天然气勘探的不断深入, 对奥陶系白云岩储层成因的研究逐步成为地质学界的热点之一(杨西燕等, 2015; 包洪平等, 2017; 张道锋等, 2019; 于洲等, 2024)。然而, 目前关于白云岩的成因仍存在着诸多的争议。不同的学者基于各自的研究方法和数据, 提出了多种白云岩成因模式, 如准同生白云岩化(Lukoczki et al., 2019; 包洪平等, 2017; 于洲等, 2024)、混合水白云岩化(包洪平等, 2017)、渗透回流白云岩化(包洪平等, 2017; 苏中堂等, 2017; Garaguly et al., 2018; Yamamoto et al., 2018; 张道锋等, 2019; Ngia, et al., 2019; 于春勇等, 2021; 廖慧鸿等, 2022)和埋藏白云岩化(苏中堂等, 2017; Kaczmarek and Sibley, 2018; Al-aasm and Crowe, 2018; 于洲等, 2024; 廖慧鸿等, 2022)等。这些研究虽然在一定程度上解释了白云岩的形成过程, 但由于所处地质条件的复杂性和实验方法的局限性, 尚未形成统一的认识(Garaguly et al., 2018; Yamamoto et al., 2018; Ngia, et al., 2019)。

鄂尔多斯盆地奥陶系沉积时期在东部华北海和西部祁连海的共同作用下, 地处碳酸盐岩台地、碳酸盐岩斜坡、局限海洼地等复杂的沉积环境, 奥陶系沉积后又经历了多期构造运动的叠加改造, 这些沉积和构造背景的差异对白云岩的形成和分布都会产生重要的影响(邵东波等, 2019; 周进高等, 2020; 于洲等, 2021)。深入研究鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩的成因, 需要综合考虑地质演化过程中的各种因素。目前, 关于鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩的成因, 中东部华北海马家沟组研究多集中于稳定构造背景下的埋藏/渗透回流成因探讨, 而西缘克里摩里组受控于祁连海沉积, 加之多期构造叠加的影响, 断裂发育且可能存在热液参与, 现有的研究尚未涉及深浅断裂与白云岩形成机制的耦合关系(吴东旭等, 2019; 吴兴宁等, 2020)。鄂尔多斯盆地西缘复杂构造带不仅有深大断裂体系的存在, 而且经历了海西、印支、燕山、喜马拉雅期多期构造运动的叠加改造(席胜利等, 2024)。多期构造活动往往伴随着深部构造热流体的活动, 导致白云岩的形成可能具有深部热流体的参与, 在这种构造背景下发育的白云岩成因的研究应更多考虑构造-流体-岩石之间的相互耦合作用(Wang et al., 2014; Kaczmarek and Sibley, 2018)。

四川盆地及塔里木盆地这种处于复杂构造背景受断裂系统控制的热液白云岩, 一般伴随有马鞍状白云石、萤石、石英以及硫化物等较高温度的矿物组合, 氧同位素由于高温下同位素分馏的减少而表现出明显的负值, 同时流体包裹体的温度较高, 复杂的叠加改造往往造成了白云岩失去了原始的稀土元素特点, 表现出起伏不定的复杂变化特征(曹自成等, 2020; 何溥为等, 2021; 杨朝屹等, 2024; 王丹, 2024)。鄂尔多斯西缘复杂构造带奥陶系克里摩里组白云岩是否具有热液成因的特征, 本次研究旨在综合运用岩石学、地球化学以及构造学等多学科, 通过对白云岩的岩石特征、地球化学组成、碳氧同位素特征、沉积环境等方面多要素的综合分析, 揭示白云岩的形成过程和控制因素, 建立起“沉积基础-构造驱动-流体改造”相耦合的白云岩成因模式。研究成果将为鄂尔多斯盆地西部复杂构造带奥陶系油气勘探、井位部署提供新的科学依据。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部, 是一个稳定沉降、拗陷迁移、扭动明显的多旋回克拉通盆地(李振宏等, 2015; 翟明国, 2021; 何发岐等, 2022; 翟咏荷等, 2024)。盆地内部地质结构复杂, 可分为多个次级构造单元, 主要包括伊盟隆起、渭北隆起、伊陕斜坡、天环拗陷和西缘冲断带。伊陕斜坡是最主要的含油气区, 地层平缓, 构造简单, 以单斜构造为主, 而西缘冲断带则受多期强烈的挤压改造作用, 发育了一系列逆冲断层和褶皱构造, 地层变形复杂(李振宏等, 2015)。从大地构造位置来看, 鄂尔多斯西缘位于华北板块与祁连-阿拉善构造带的过渡区域, 这种特殊的构造位置使得盆地在地质历史时期受到多方向构造应力的作用, 经历了复杂的构造演化过程(图1)。在早古生代, 鄂尔多斯盆地处于相对稳定的克拉通边缘环境, 接受了广泛的海相沉积, 受盆地中央古隆起的控制, 西缘主要接受祁连海域的沉积(付金华和郑聪斌, 2001)。晚古生代, 受南部秦岭洋和北部古亚洲洋闭合的影响, 海水逐渐退出了鄂尔多斯盆地, 沉积环境由早期的海相沉积, 逐步过渡到海陆交互相沉积(李文厚等, 2021; 吴芳等, 2024)。中生代, 盆地西缘的造山带逐渐隆升, 对区域沉积环境和构造格局产生了重要的控制作用(李振宏等, 2015; 董晓朋等, 2023; 寇琳琳等, 2024)。鄂尔多斯盆地西缘独特的地质构造和演化历史对奥陶系克里摩里组白云岩的形成有着深远的影响。



图例
 灰岩 泥质灰岩 含泥白云岩 白云岩 硅质页岩 古陆 构造分区 相边界 断裂
 ① 正谊关断裂 ② 桌子山东麓断裂 ③ 贺兰山东麓断裂 ④ 黄河断裂 ⑤ 中宁-中卫断裂 ⑥ 青铜峡-固原断裂 ⑦ 烟筒山断裂 ⑧ 清水河断裂
 ⑨ 香山-天景山断裂 ⑩ 严家湾断裂 ⑪ 惠安堡-沙井子断裂 ⑫ 青铜峡-平凉断裂 ⑬ 韦州-安国断裂 ⑭ 海原断裂 ⑮ 六盘山西麓断裂

a-鄂尔多斯盆地西缘构造纲要图; b-奥陶系克里摩里组沉积相图

图1 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组沉积相图

Fig.1 Sedimentary facies map of the Ordovician Kermoli Formation in the western margin of the Ordos Basin

a-schematic diagram of the western margin of Ordos Basin;b-sedimentary facies diagram of Ordovician Kelimolli Formation

鄂尔多斯盆地在不同地质时期沉积了多种类型的地层,包括寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系等。奥陶纪时期,盆地沉积了一套以碳酸盐岩为主的海相地层,这些碳酸盐岩的沉积环境和物质来源对白云岩的形成具有重要意义。从沉积特征来看,奥陶系岩性组合呈现出多样化,在盆地的不同区域,厚度存在着明显的差异(郭彦如等, 2014)。在盆地东部,奥陶系厚度相对较薄,一般在几百米左右;而在盆地西部,地层厚度则可达上千米,这种区域厚度上的差异反映了当时沉积环境的不均衡性(赵振宇等, 2015)。鄂尔多斯西缘奥陶系主要发育于贺兰裂陷槽及其周缘地区,沉积序列主要包括下奥陶统三道坎组和桌子山组,中奥陶统克里摩里组和乌拉力克组,上奥陶统拉什仲组和公乌素组(王振涛等, 2016; 吴东旭等, 2018)。奥陶系克里摩里组沉积时期,研究区发育碳酸盐岩台地、碳酸盐岩斜坡、广海陆棚和深水盆地4种沉积相类型,碳酸盐岩斜坡带又进一步可以划分为颗粒滩和灰质洼地,颗粒滩是白云岩形成的主要沉积相带(图1)。

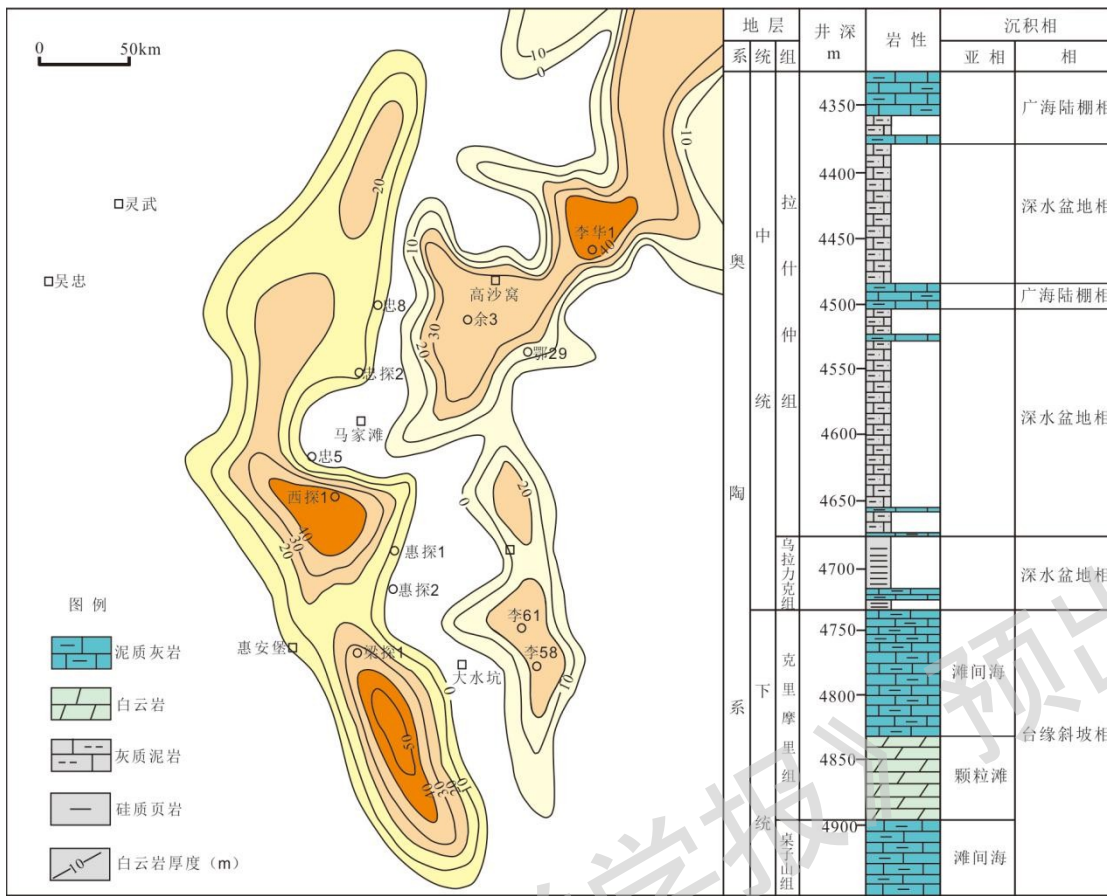


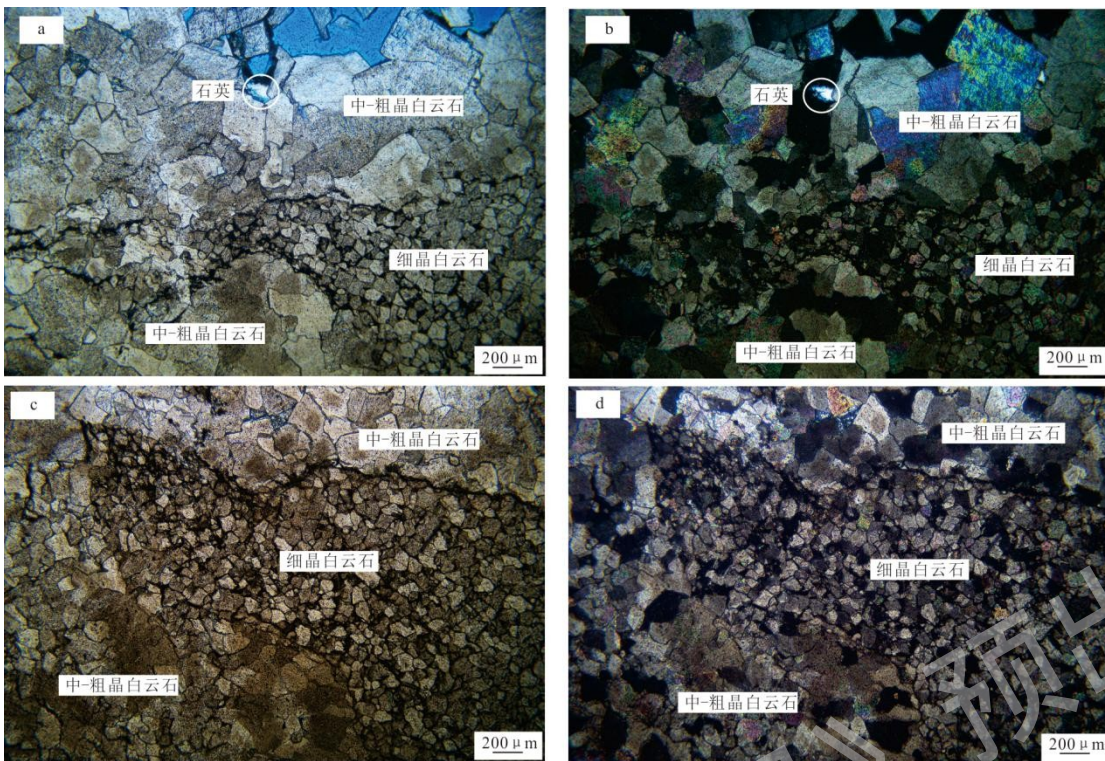
图2 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩厚度及西探1井综合柱状图

Fig.2 The thickness of the dolomite of the Ordovician Cremory Formation in the western margin of the Ordos Basin and the comprehensive histogram of Well 1 in the west

2 样品采集及分析

2.1 样品采集

鄂尔多斯西缘断褶带中段奥陶系克里摩里组高能滩沉积相带主体呈东西南北向两条分带，均钻遇厚度不等的白云岩储层（图2）。西部高能滩相带以梁探1、西探1钻井为核心，东部高能滩相带以李58、鄂29以及李华1井为核心，白云岩储层最大厚度达50余米。西探1井是中国石油长庆油田分公司2024年在西缘断褶带完钻的1口天然气风险探井，钻探目的是为了查明盆地西缘冲断带下盘隐伏构造内克里摩里组滩相白云岩储层发育与含气情况，该井在克里摩里组钻探白云岩储层厚度达40余米。为了查明系西探1井克里摩里组白云岩的成因，本次分析测试样品依据镜下鉴定结果，分别选取细晶白云岩27件，中粗晶白云岩3件，开展系统的碳氧同位素、有序度及地球化学元素分析（图3）。同时，为了分析白云岩后期改造热流体的来源，分别在西探1井中粗晶白云岩段选取样品5件，与西探1井相邻的青龙山剖面选取灰岩样品5件，开展锶同位素分析测试。在岩石薄片下，微裂缝发育，中粗晶白云岩沿着微裂缝发育，交代早期的细晶白云岩，中粗晶白云岩与细晶白云岩界限明显（图3）。



a. 克里摩里组, 西探 1 井, 4832.35m, 单偏光; b. 克里摩里组, 西探 1 井, 4832.35m, 正交偏光; c. 克里摩里组, 西探 1 井, 4833.15m, 单偏光; d. 克里摩里组, 西探 1 井, 4833.15m, 正交偏光
图 3 西探 1 井奥陶系克里摩里组白云岩镜下典型特征照片

Fig.3 Photographs of typical microscopic features of dolomite from the Kelimoli Formation of the Ordovician system in Well Xi Tan 1
a. Kelimoli Formation, Well Xi Tan 1, 4832.35m, single polarized light; b. Kelimoli Formation, Well Xi Tan 1, 4832.35m, Orthoscopic polarized light; c. Kelimoli Formation, Well Xi Tan 1, 4833.15m, single polarized light; d. Kelimoli Formation, Well Xi Tan 1, 4833.15m, Orthoscopic polarized light

2.2 测试方法

白云岩阴极发光、碳氧同位素、有序度及地球化学元素分析均在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。阴极发光实验使用 CL8200 MK5 型阴极发光仪进行测试, 考虑到样品之间的相互可参照性, 所有样品均采用了相同的实验条件, 实验过程中始终保持电压 15 kv, 束电流在 400 μ A, 室内温度 20 $^{\circ}$ C, 相对湿度 60 %。样品的碳氧同位素利用 DELTA V Advantage SN09017D Thermo Fisher 同位素比值质谱仪 (IRMS) 进行测试, 数据处理均采用 Workspace 软件完成, 碳氧同位素比率均以 δ 表示, 标准化为 PDB。白云岩有序度采用日本理学 Rigaku Ultima IV X 射线衍射仪测试, 地球化学元素数据均通过激光原位地球化学元素实验测量获得, 测试方法见李阳等 (2024), 本次研究所使用的稀土元素数据都利用澳大利亚太古宙页岩 (PAAS) 标准化消除奇偶效应。锶同位素样品分析的主要采用 Sr 特效树脂法, 样品消解溶液被蒸干后, 加入 1mL 3mol/L HNO₃ 等待化学分离。溶液经 Sr 特效树脂 (100~150 μ m) 交换柱, 先用 3mol/L HNO₃ 淋洗出基质元素, 再用 0.05mol/L HNO₃ 淋洗并接收 Sr 组分, 最后用 6.0mol/L HCl 清洗树脂。纯 Sr 组分被蒸干后, 先用 1.0mL 2%稀硝酸溶解, 将其作为母液; 取其中 100ul 稀释成 1.0mL, 在 Agilent 7900 四极杆型 ICP-MS 上测定 Sr 准确含量; 再用 2%稀硝酸将 Sr 母液稀释成 2.0mL 50ppb Sr。上机溶液经 CETAC Aridus III 膜去溶系统引入, 在 Neptune XT MC-ICP-MS 上测定 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素比值。测定过程中, 采用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194 内部校正仪器质量分馏, Sr 同位素国际标准物质 NIST SRM 987 作为外标校正仪器漂移。

3 结果与讨论

3.1 白云岩成因

3.1.1 阴极发光

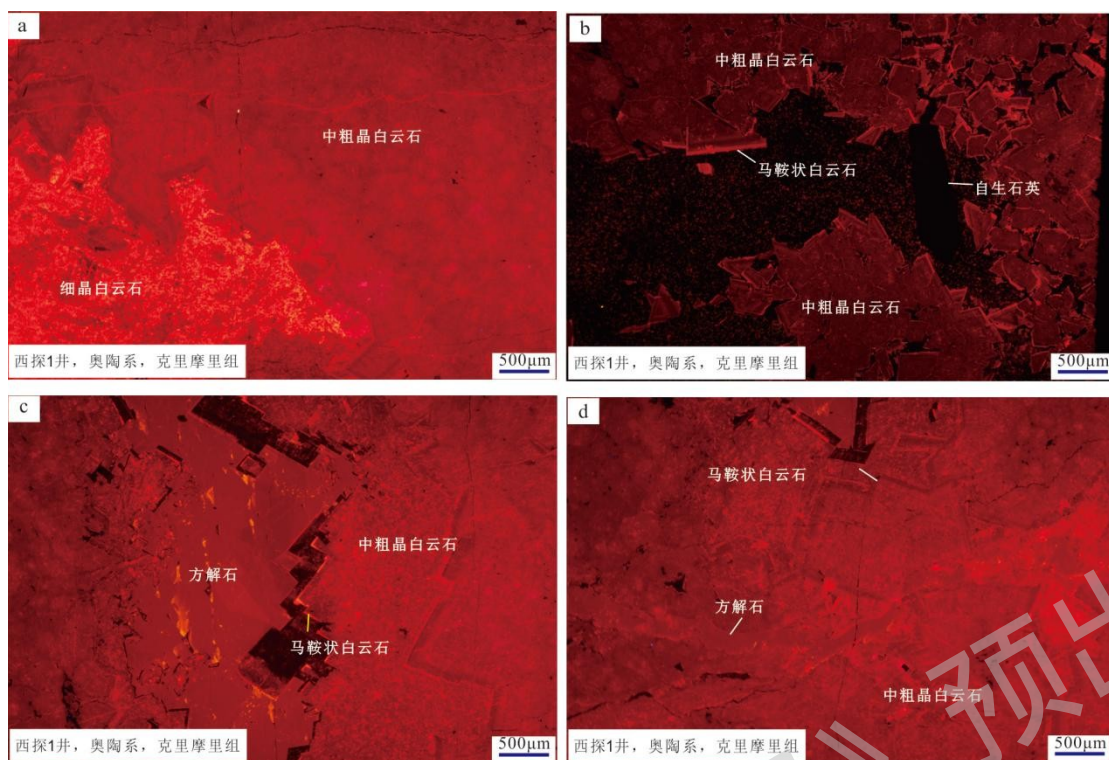
白云岩阴极发光性的强弱主要受其 Mn、Fe 元素含量的控制, 阴极发光的来源是 Mn 元素, 而 Fe 元素却会阻滞或抑制白云岩发光。因此, Fe/Mn 的比值控制着白云岩阴极发光的强度, 当 Fe/Mn 比值较大时, 通常表

现为不发光或者具有较暗发光。根据白云石阴极发光的强度可以判断其成岩环境，不发光的白云岩定性解释为氧化环境的产物，常见于近地表受大气淡水影响的成岩环境，明亮发光的白云石通常形成在埋藏成岩作用的早期—中期阶段，具有还原环境，与晶体中相对低的 Fe/Mn 比值有关。昏暗发光常见于具有较高 Fe/Mn 比值的白云岩晶体中，通常形成于埋藏成岩作用中—晚期阶段（成晓啉等，2013；何溥为等，2021.）。鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩组成矿物以细晶和中-粗晶两种白云岩为主，阴极发光细晶白云岩表现明亮发光，中粗晶白云岩表现出较弱的暗褐色发光，具有多期重结晶埋藏成因的特征（图 4a）。白云石晶体阴极发光环带特征明显（图 4b,c），裂隙或溶孔中发育典型的热液矿物马鞍状白云石及自生石英，马鞍状白云石具雾心亮边结构，自生石英不发光。溶蚀孔洞和裂隙核部还充填有与后期热液活动密切相关的方解石，在阴极发光照片中呈现出黄褐色的特征（图 4c,d）。阴极发光揭示了克里摩里组白云岩的多期重结晶特征，可通过碳氧同位素的古温度、古盐度数据进一步佐证。

3.1.2 碳氧同位素

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值的大小主要受流体介质古温度和古盐度的影响，根据碳氧同位素值的变化可以用来判断白云岩的成因（强深涛等，2017；李文奇等，2023）。碳酸盐岩中碳同位素组成的变化受成岩作用和温度变化的影响较小，主要决定于不同来源流体的作用，一般认为典型海水成因的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般介于 $0\text{‰}\sim 4\text{‰}$ 之间。 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化主要受埋藏成岩过程中温度的影响，温度越高，氧同位素值越低（Zhou et al.,2020）。 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -5‰ 时，原始碳酸盐岩沉积物开始发生部分蚀变， $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -10‰ 时，碳酸盐岩沉积物应该受到了强烈成岩作用的改造，几乎完全发生了蚀变作用（Li et al., 2009）。鄂尔多斯西缘奥陶系克里摩里组白云岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别介于 $0.28\text{‰}\sim 0.88\text{‰}$ 和 $-0.81\text{‰}\sim -0.75\text{‰}$ 两个区间，前者属于典型海水成因，后者明显受到了不同碳来源流体的改造或者有机质的参与。氧同位素值均小于 -5‰ ，其中细晶白云岩值介于 $-8.44\text{‰}\sim -6.99\text{‰}$ ，部分碳酸盐岩沉积物开始发生了蚀变，而中-粗晶马鞍状白云岩值介于 $-13.85\text{‰}\sim -13.65\text{‰}$ 之间，显然碳酸盐岩沉积物已经发生了强烈的蚀变改造作用，白云岩化相对比较彻底。碳氧同位素值的变化，不仅反映了鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩具有深埋藏成因的因素，并且晚期白云岩化有异常热流体的参与，更具有因构造活动引起的，具有深部流体参与的热液白云岩化成因的特点。

利用白云岩中碳/氧同位素组成可以恢复古代白云岩形成时的古盐度（Z）和古温度（T），进而开展白云岩成因的分析（邵龙义等，1996）。鄂尔多斯西缘断褶带中段奥陶系克里摩里组白云岩，按照碳氧同位素值恢复的古地温分别位于 $51\sim 60\text{°C}$ 和 $97\sim 98\text{°C}$ 两个区间，古盐度除 3 个样品为 119 外，其余的均介于 124~126 之间（表 1）。鄂尔多斯盆地古生代古地温梯度为 $2.5\sim 3.0\text{°C}$ （任战利，2017），取地表平均温度 30°C ，地温梯度按照 $3\text{°C}/100\text{m}$ 计算，鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组细晶白云岩形成于埋深 1000m 的范围内，具有马鞍状交代的中-粗晶白云石按照正常的地温梯度形成于埋深大约 2300m 的深度。根据西探 1 井奥陶系克里摩里组的埋藏深度，细晶白云岩形成于二叠纪末期，而中粗晶白云岩主要形成于侏罗纪末期，具有埋藏成因的特征。通过碳氧同位素值可以恢复侏罗纪及时代更新的白云岩形成时的古盐度（邵龙义，1994），但由于地质历史时碳酸盐岩形成后，其碳同位素相对稳定难以交换，并且古盐度值主要取决于碳同位素值，因此仍可以采用古盐度计算公式来表示前侏罗纪时期白云岩形成时期古盐度的变化（邵龙义，1994）。鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组 30 个白云岩样品中，除了中-粗晶马鞍状白云石的 3 个样品古盐度值为 119 外，其它细晶白云岩的古盐度值均大于 120，马鞍状白云石古盐度值低于 120，结合碳氧同位素值的特征，显然是受到了晚成岩期构造热流体的改造作用，由于构造热流体的加入，古盐度较早期细晶白云岩略有降低。



a. 细晶白云岩明亮发光, 中粗晶白云岩较弱的暗褐色发光; b. 马鞍状白云石呈雾心亮边结构, 自生石英不发光; c. 马鞍状白云石呈雾心亮边结构, 方解石呈现黄褐色; d. 方解石呈现黄褐色

图4 鄂尔多斯盆地西缘西探1井奥陶系克里摩里组白云岩阴极发光照片

Fig.4 Cathodoluminescence map of the dolomite of the Ordovician Kerymory Formation in Well 1 of the western margin of the Ordos Basin

a. Fine-grained dolomite exhibits bright fluorescence, while medium to coarse-grained dolomite shows weaker dark brown fluorescence; b. Saddle-shaped dolomite has a foggy core and bright rim structure, and authigenic quartz does not fluoresce; c. Saddle-shaped dolomite has a foggy core and bright rim structure, and calcite appears yellowish-brown; d. Calcite appears yellowish-brown

表1 鄂尔多斯盆地西缘西探1井白云岩碳氧同位素和有序度分析结果统计表

Table1 Statistical table of carbon and oxygen isotope and order analysis results of dolomite from Well Xitan 1 in the western margin of the Ordos Basin

序号	岩性	井深 (m)	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	古盐度 Z	古温度 T (°C)	有序度
1	中粗晶白云岩	4830.13	-0.75	-13.85	119	98	0.54
2	细晶白云岩	4830.26	0.43	-8.44	124	60	0.7
3	中粗晶白云岩	4830.39	-0.78	-13.75	119	98	0.56
4	细晶白云岩	4830.54	0.88	-6.99	126	51	0.64
5	中粗晶白云岩	4830.65	-0.81	-13.65	119	97	0.58
6	细晶白云岩	4830.88	0.57	-7.13	125	52	0.7
7	细晶白云岩	4831.08	0.82	-7.13	125	52	0.63
8	细晶白云岩	4831.25	0.72	-7.50	125	54	0.56
9	细晶白云岩	4831.48	0.62	-7.61	125	55	0.78
10	细晶白云岩	4831.6	0.72	-7.28	125	53	0.62
11	细晶白云岩	4831.75	0.75	-7.45	125	54	0.8
12	细晶白云岩	4831.92	0.78	-7.38	125	54	0.82
13	细晶白云岩	4832.04	0.77	-7.35	125	53	0.61
14	细晶白云岩	4832.25	0.72	-7.45	125	54	0.6
15	细晶白云岩	4832.53	0.67	-7.50	125	54	0.68
16	细晶白云岩	4832.73	0.61	-7.20	125	53	0.67

17	细晶白云岩	4832.85	0.65	-7.52	125	54	0.65
18	细晶白云岩	4833.02	0.28	-8.02	124	58	0.75
19	细晶白云岩	4833.33	0.54	-7.57	125	55	0.64
20	细晶白云岩	4833.5	0.53	-7.30	125	53	0.72
21	细晶白云岩	4833.65	0.52	-7.82	124	56	0.62
22	细晶白云岩	4833.79	0.34	-7.58	124	55	0.73
23	细晶白云岩	4833.92	0.57	-7.34	125	53	0.72
24	细晶白云岩	4834.04	0.61	-7.16	125	52	0.55
25	细晶白云岩	4834.15	0.60	-7.64	125	55	0.66
26	细晶白云岩	4834.24	0.58	-7.68	125	55	0.65
27	细晶白云岩	4834.4	0.57	-7.41	125	54	0.68
28	细晶白云岩	4834.6	0.55	-7.62	125	55	0.7
29	细晶白云岩	4834.75	0.56	-7.72	125	56	0.65
30	细晶白云岩	4835	0.52	-7.33	125	53	0.69

注：古温度计算公式： $T=16.9-4.2*(\delta^{18}O_{V-PDB}+0.22)+0.13*(\delta^{18}O_{V-PDB}+0.22)^2$ (邵龙义, 1994)
 古盐度计算公式： $Z=2.048*(\delta^{13}C_{V-PDB}+50)+0.498*(\delta^{18}O_{V-PDB}+50)$ (Keith and Weber,1964)

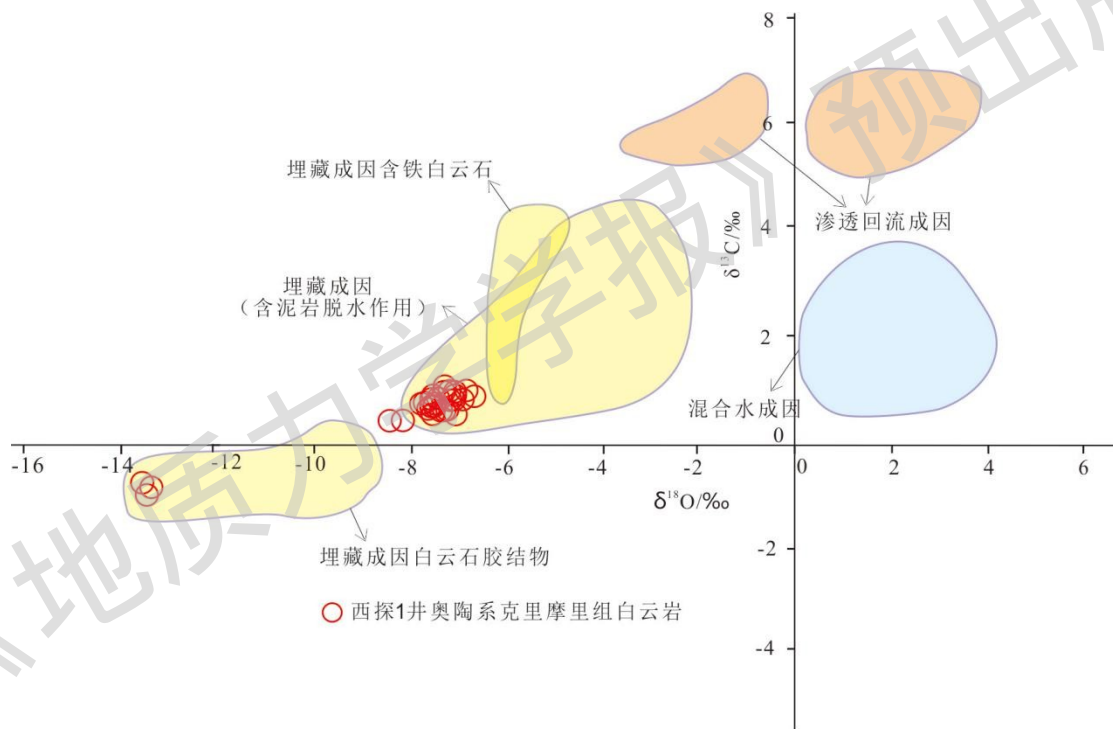
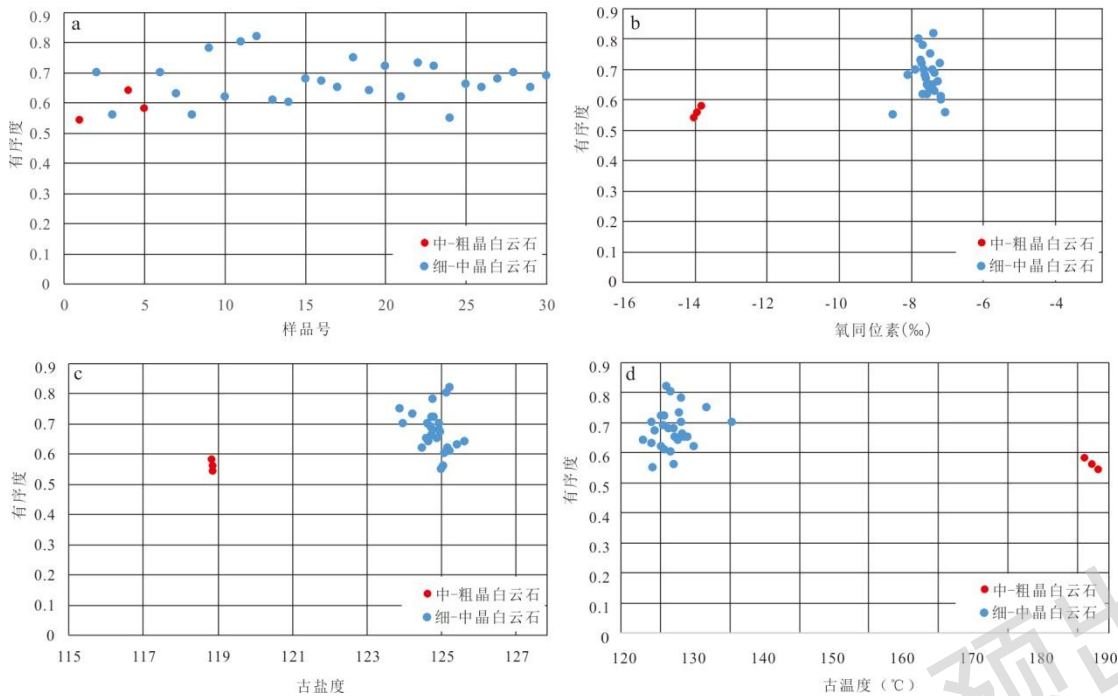


图5 鄂尔多斯盆地西缘西探1井奥陶系克里摩里组白云岩碳氧同位素交汇图解 (据Hird, 1987)
 Fig.5 Diagram of carbon-oxygen isotope intersection in the dolomite from the Kelimoli Formation ,Ordovician,Well Xitan1, western margin of the Ordos Basin (after Hird,1987)

Hird (1987) 根据碳氧同位素值的交汇关系, 提出了不同成因白云石碳氧同位素的图解 (图5)。渗透回流成因和混合水成因的白云石碳氧同位素值明显偏正, 但渗透回流成因比混合水成因的白云石碳同位素值更偏正, 埋藏成因的白云石由于高温作用氧同位素要明显向偏负的方向发展, 而且温度越高, 氧同位素的值越低 (Hird, 1987)。在碳氧同位素交汇图解中, 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩主要落入了两个区间范围内, 细晶白云岩的27个样品主要落入了埋藏成因 (含泥岩脱水作用) 范围内, 而中粗晶马鞍状白云石的3个样品全部落实了埋藏成因白云石胶结物的范围。前者说明白云岩形成时期可能受到了烃类流体的改造, 而后者白云岩在形成时明显受到了构造热流体的改造。碳氧同位素的古温度和古盐度恢复揭示出了两期成因的白云岩特征, 利用白云岩有序度可以进一步证实不同温度条件下白云岩结晶速度的差异。



a. 白云岩有序度;b. 氧同位素与有序度相关性分析;c. 古盐度与有序度相关性分析;d. 古温度与有序度相关性分析

图6 白云岩有序度及相关性分析图

Fig.6. Orderliness and correlation analysis of dolomite

a. Dolomite orderliness; b. Analysis of the correlation between oxygen isotopes and ordering; c. Analysis of the correlation between ancient salinity and ordering; d. Analysis of the correlation between ancient temperature and ordering

3.1.3 X射线衍射有序度

白云岩有序度是表征白云岩成因的重要指标,白云岩的有序度与结晶速度有关。环境稳定的白云岩结晶速度慢,有序度高;环境变化较快的白云岩结晶速度快,有序度低。准同生白云岩形成时受水体的影响,环境比较动荡,白云岩有序度低。埋藏白云石是在高的温度和压力条件下交代灰岩,高的温度可以克服白云石化的动力学阻碍,有利于白云石化作用,有序度相对较高。但受构造运动影响热流体成因的白云岩,由于白云岩的结晶速度相对过快,有序度却往往表现出并不太高的特点(狄贵东等, 2024)。四川盆地高石梯地区栖霞组白云岩为构造热液流体成因,白云岩的有序度总体都不是很高,介于0.50~0.76之间,并且中-粗晶白云岩的有序度明显低于细-中晶白云岩的有序度,显示出中-粗晶白云石形成时间晚,受到构造热流体作用的特点(狄贵东等, 2024)。鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩的有序度介于0.54~0.82之间,总体显示出不太高的特点(图6a)。其中,中-粗晶白云岩的有序度介于0.54~0.58之间,明显低于细-中晶白云石的有序度,与四川盆地高石梯地区栖霞组构造热液成因的白云岩有序度基本相当,反应了白云石成因受到构造热流体影响的特点。根据氧同位素、古盐度以及古温度与有序度的相关性分析,氧同位素值越低(图6b),古温度越高(图6c),古盐度越低(图6d),有序度越低,说明白云岩是在较高温,结晶速度较快的环境下形成的,白云岩的成因是在深埋藏背景下,局部受到了构造热流体的参与。白云岩有序度揭示出中粗晶白云岩可能受到晚期热流体的改造,通过稀土元素、微量元素结合锶同位素,可以进一步揭示流体的来源。

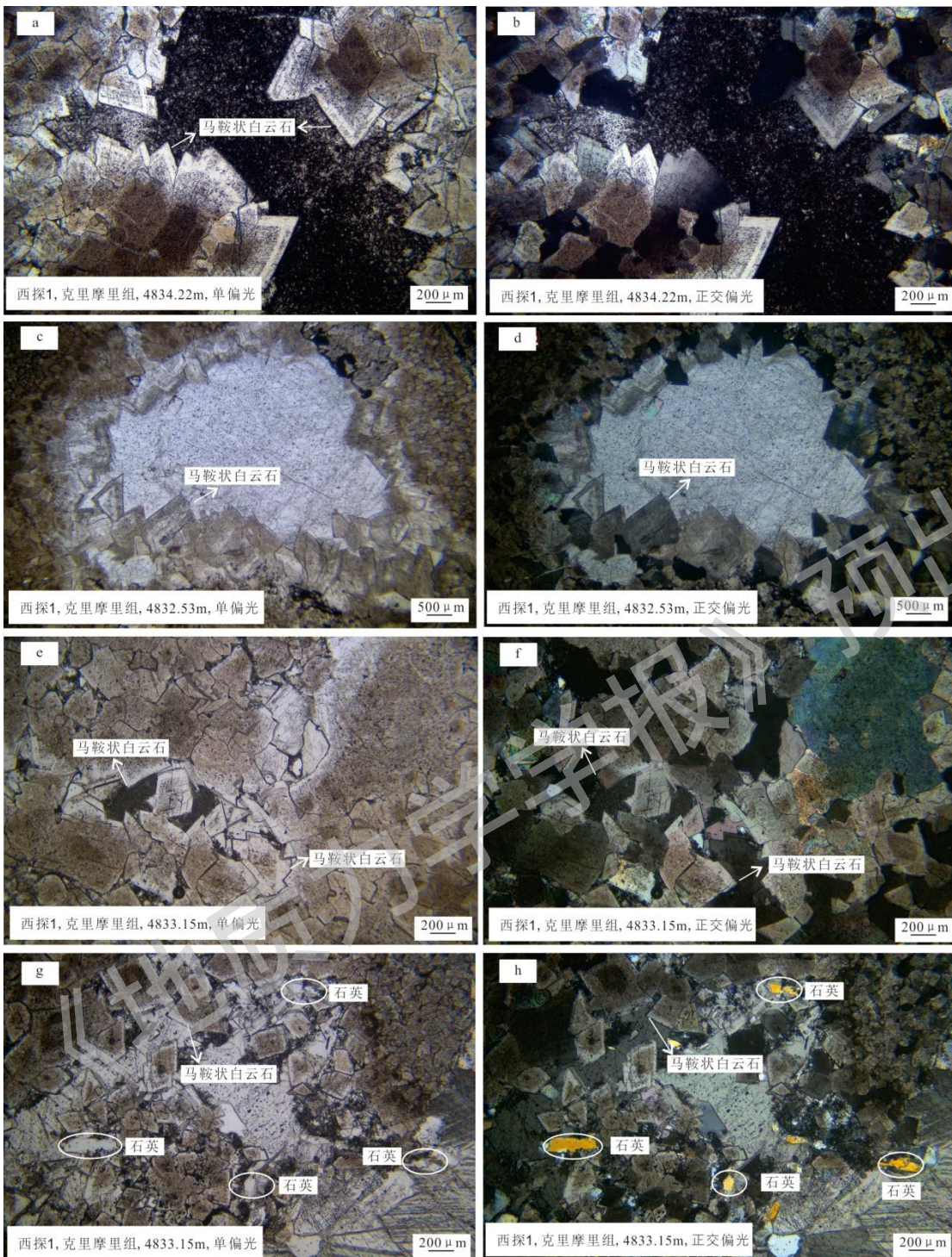


图7 西探1井奥陶系克里摩里组白云岩典型热液矿物镜下特征

Fig.7 Typical hydrothermal mineral characteristics of dolomite in the Krimoli Formation of the Ordovician at Well Xi Tan 1 under microscopic observation

3.1.4 稀土元素

白云岩化后的成岩作用对白云岩形成期的稀土元素组成几乎不产生太大的影响，因此稀土元素的参数可以作为白云岩成岩过程中的有效指标来探讨白云岩的成因（刘建清等，2014）。在稀土元素标准化值中， $(Nd/Yb)_{SN}$ 比值可以作为判断轻重稀土元素富集程度的重要参数（Nothdurft et al., 2004）。Ce 和 Eu 在稀土元素中是典型的变价元素，它们在碳酸盐岩中的异常程度可以有效反应沉积水体或成岩流体的氧化还原环境，

Ce、Eu 异常特征经常被用来判断白云岩化的流体性质及其形成环境（余新亚等，2015）。稀土元素 Ce 异常是指 Ce 元素相对于 La 和 Pr 的富集程度，通常在近地表氧化条件下亏损，而在深埋藏还原条件下，特别是在成烃流体的参与下，则表现为相对富集。稀土元素 Eu 对温度很敏感，当温度升高且压力增加时，流体中的 Eu 主要表现为 Eu^{2+} 的形式， Eu^{2+} 和 Ca^{2+} 具有相同的电价和相似的离子半径， Eu^{2+} 会进一步取代 Ca^{2+} ，容易进入热液矿物的晶格而呈现出强烈的 Eu 正异常（李让彬等，2021）。鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩稀土元素总量介于 $4.62\sim 11.02\times 10^{-6}$ 和 $33.72\sim 35.54\times 10^{-6}$ 两个区间，均低于后太古界澳大利亚沉积岩 PAAS 的平均值 184.8×10^{-6} ，说明白云岩在沉积过程中以及后期成岩过程中均未受到陆源物质的影响（表 2）。Ce 异常值介于 5.01~13.11 和 30.81~42.81 之间，具有明显的正异常，表明白云岩形成于相对封闭的还原环境，可能受到成烃流体的改造。Eu 异常介于 1.76~3.73 和 10.08~12.82 之间，显著的正异常说明白云岩的成因有热液作用存在密切的关系（Wang et al.,2014）。与热液有关的白云岩，常常伴随有马鞍状白云石以及与之共生的天青石、萤石、重晶石、硅质岩等热液矿物（Davies and Smith, 2006）。

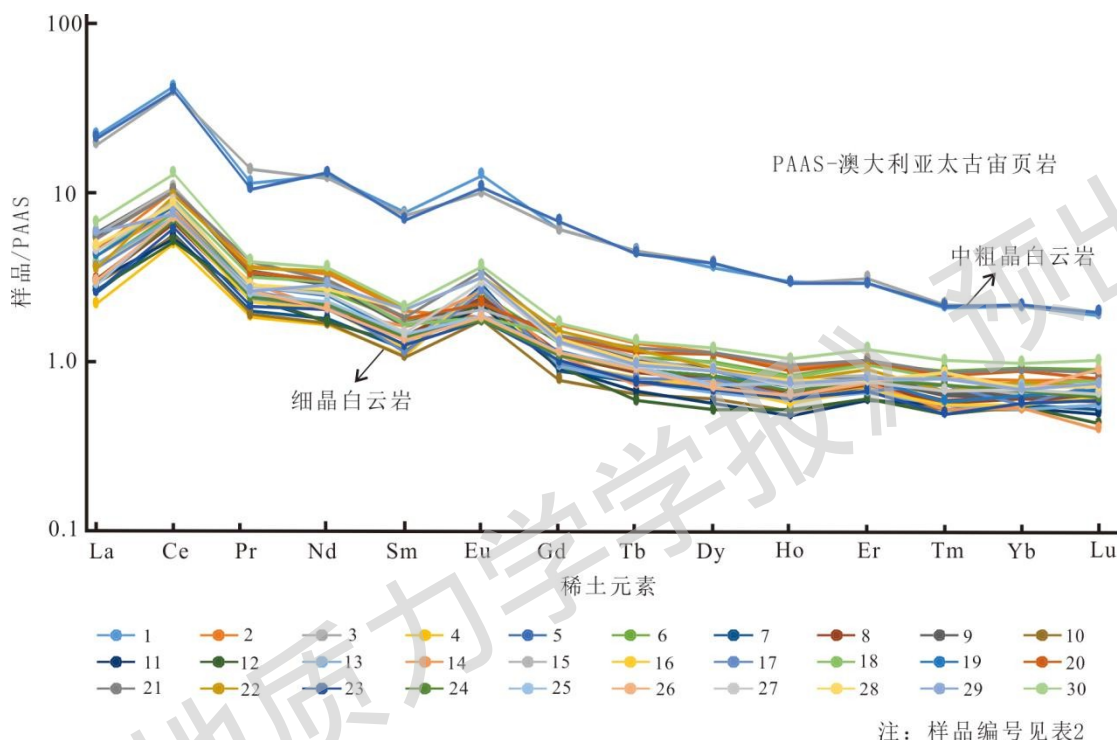


图 8 鄂尔多斯西缘奥陶系克里摩里组白云岩稀土元素标准化曲线

Fig.8 Standardization curve of rare earth elements in the dolomite of the Ordovician Cremori Formation in the western margin of Ordos

西探 1 井奥陶系白云岩中溶蚀孔洞中均可以普遍见到马鞍状白云石及自生石英，显然受到了热液作用的改造（图 7）。中-粗晶白云岩和细-中晶白云岩的稀土元素配分模式基本一致， $(\text{Nd}/\text{Yb})_{\text{SN}}$ 比值 2.6~6.08 之间，明显表现为轻稀土富集，重稀土亏损的特点（图 8）。正 Ce 异常、正 Eu 异常的特点，表明二者的成岩环境基本一致，其形成过程都是在相对封闭（正 Ce 异常），相对较高的温度和压力（正 Eu 异常）条件下，成岩系统内部流体相互调整和再分配的结果。中-粗晶白云岩的稀土元素总量以及 Ce 和 Eu 异常的程度要明显高于细-中晶白云岩，说明前者是后者在白云岩化过程中成岩流体的进一步改造或者再分配的结果。正 Ce 异常显示了成岩-成烃流体作用下白云岩成因的特点，正 Eu 异常显示了热液流体作用下白云岩进一步改造的特点。研究区白云岩成因可能是成岩-成烃流体与热液流体相互叠加多期次作用的产物，这一特征与塔里木盆地塔中地区奥陶系白云岩的稀土元素配分模式基本一致，显示了构造热液白云岩化的特点。

表 2 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩稀土元素分析统计表

Table 2 Rare earth element analysis statistics of the Ordovician Crammolian Formation in the western margin of the Ordos Basin

序号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
		$\times 10^{-6}$														
1	中粗晶白云岩	6.88	13.27	1.42	7.71	1.50	0.38	1.59	0.22	1.18	0.21	0.62	0.07	0.45	0.06	9.69

2	细晶白云岩	1.46	3.19	0.45	1.98	0.39	0.08	0.43	0.06	0.37	0.07	0.22	0.03	0.16	0.03	2.76
3	中粗晶白云岩	6.04	12.34	1.69	7.40	1.45	0.30	1.58	0.22	1.25	0.21	0.66	0.07	0.45	0.06	9.44
4	细晶白云岩	0.69	1.56	0.23	1.01	0.22	0.05	0.23	0.04	0.22	0.05	0.15	0.02	0.14	0.02	1.81
5	中粗晶白云岩	6.59	12.65	1.29	7.95	1.36	0.32	1.77	0.21	1.24	0.21	0.61	0.07	0.46	0.06	9.71
6	细晶白云岩	1.18	2.39	0.34	1.60	0.34	0.19	0.34	0.05	0.33	0.06	0.21	0.03	0.19	0.03	2.47
7	细晶白云岩	0.81	1.80	0.25	1.09	0.23	0.21	0.23	0.04	0.24	0.04	0.15	0.02	0.12	0.02	1.56
8	细晶白云岩	0.96	2.12	0.30	1.33	0.28	0.17	0.29	0.04	0.27	0.05	0.16	0.02	0.13	0.02	1.77
9	细晶白云岩	1.78	3.26	0.41	1.77	0.33	0.17	0.35	0.05	0.29	0.05	0.17	0.02	0.13	0.02	2.18
10	细晶白云岩	0.92	1.74	0.24	1.01	0.21	0.13	0.20	0.03	0.19	0.04	0.13	0.02	0.11	0.02	1.43
11	细晶白云岩	0.95	1.69	0.29	1.05	0.25	0.16	0.24	0.03	0.18	0.04	0.13	0.02	0.11	0.02	1.39
12	细晶白云岩	0.85	1.62	0.30	1.04	0.25	0.17	0.25	0.03	0.17	0.04	0.13	0.02	0.11	0.01	1.29
13	细晶白云岩	1.21	2.26	0.29	1.23	0.25	0.20	0.25	0.04	0.21	0.04	0.14	0.02	0.11	0.02	1.69
14	细晶白云岩	1.33	2.45	0.36	1.25	0.32	0.19	0.29	0.04	0.25	0.05	0.16	0.02	0.11	0.01	1.73
15	细晶白云岩	1.79	3.35	0.42	1.85	0.33	0.15	0.37	0.05	0.29	0.06	0.18	0.02	0.14	0.02	2.37
16	细晶白云岩	1.15	2.15	0.28	1.24	0.24	0.19	0.25	0.04	0.23	0.04	0.15	0.02	0.12	0.02	1.65
17	细晶白云岩	1.13	2.14	0.33	1.33	0.23	0.20	0.26	0.04	0.26	0.05	0.14	0.01	0.12	0.02	1.69
18	细晶白云岩	1.33	2.81	0.39	1.81	0.33	0.14	0.37	0.06	0.32	0.06	0.20	0.03	0.15	0.03	2.35
19	细晶白云岩	1.33	2.62	0.34	1.50	0.28	0.14	0.30	0.04	0.27	0.05	0.17	0.02	0.13	0.02	2.03
20	细晶白云岩	1.66	3.23	0.42	1.83	0.36	0.17	0.37	0.05	0.36	0.06	0.21	0.03	0.19	0.03	2.29
21	细晶白云岩	1.69	3.24	0.48	1.84	0.36	0.25	0.37	0.06	0.37	0.07	0.22	0.03	0.19	0.03	2.27
22	细晶白云岩	1.11	3.01	0.44	2.08	0.40	0.23	0.39	0.06	0.30	0.06	0.19	0.02	0.16	0.02	2.08
23	细晶白云岩	0.82	1.93	0.26	1.22	0.25	0.13	0.26	0.04	0.22	0.04	0.14	0.02	0.12	0.02	1.57
24	细晶白云岩	0.92	2.16	0.30	1.33	0.28	0.13	0.28	0.04	0.27	0.05	0.17	0.02	0.14	0.02	1.83
25	细晶白云岩	0.90	2.28	0.31	1.37	0.29	0.14	0.30	0.05	0.24	0.05	0.16	0.03	0.15	0.02	1.89
26	细晶白云岩	0.95	2.23	0.33	1.24	0.27	0.14	0.30	0.04	0.23	0.05	0.16	0.03	0.15	0.03	1.80
27	细晶白云岩	1.43	2.79	0.35	1.53	0.29	0.22	0.33	0.05	0.29	0.05	0.16	0.02	0.14	0.02	2.03
28	细晶白云岩	1.53	2.69	0.35	1.63	0.40	0.23	0.36	0.05	0.28	0.06	0.17	0.03	0.15	0.02	2.04
29	细晶白云岩	1.83	2.35	0.33	1.73	0.40	0.24	0.34	0.05	0.29	0.05	0.17	0.03	0.15	0.02	2.04
30	细晶白云岩	2.10	4.07	0.48	2.18	0.42	0.27	0.45	0.06	0.39	0.08	0.25	0.03	0.21	0.03	2.83

3.1.5 微量元素

微量元素 Sr、Na、Fe、Mn 的含量以及相互交汇关系在判断白云岩成岩作用和流体性质方面具有非常有效的作用。Ca²⁺ 与 Sr²⁺ 同属 +2 价并具有相近的离子半径，在海相碳酸盐岩沉积过程中 Sr 元素会以类质同像的方式取代 Ca 元素，进入碳酸盐岩的晶格。因此，碳酸盐岩成岩及白云岩化是一个消耗 Sr 元素的过程，随着白云岩化程度的加强，白云岩中 Sr 元素含量会呈现明显降低的趋势。正常海水中形成的白云岩 Sr 元素的含量在理论上一般为(470~500)×10⁻⁶，而晚期埋藏成因的白云岩 Sr 元素含量平均值多处于 100×10⁻⁶ 以内（王利超等，2016）。Na 元素含量除与碳酸盐岩沉积时的古地理环境有关外，还与后期成岩流体的性质密切相关，随

着后期烃类流体及热液流体的加入, Na 元素含量与沉积是具有明显降低的趋势, 并且晚期成岩作用 Na 元素含量要明显低于早期 (任影等, 2016)。Fe 和 Mn 元素的含量在正常的海水中表现出特别低的特点, 而在成岩过程中地层水中的 Fe 和 Mn 元素作为类质同象离子容易置换白云石晶格中的 Ca 和 Mg 离子, 随着成岩强度的增加, 白云石中 Fe 和 Mn 的含量明显的增加。

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩微量元素 Sr、Na、Fe、Mn 的含量见表 3。Sr 元素的含量可以划分出两个明显的区间, 细晶白云岩 Sr 元素的含量介于 $50.65 \times 10^{-6} \sim 74.65 \times 10^{-6}$ 之间, 中粗晶白云岩 Sr 元素的含量介于 $22.40 \times 10^{-6} \sim 28.85 \times 10^{-6}$ 之间 (表 3)。总体上, 克里摩里组白云岩 Sr 元素含量均低于 100×10^{-6} , 具有晚期埋藏成因白云岩化的特点, 并且中粗晶白云岩 Sr 元素含量相比细晶白云岩具有明显降低的趋势, 说明两期白云岩具有明显叠加改造的特点。Na 元素含量变化与 Sr 元素具有比较一致的特征, 总体上具有 $165.5 \times 10^{-6} \sim 173.6 \times 10^{-6}$ 和 $238.9 \times 10^{-6} \sim 356.6 \times 10^{-6}$ 两个变化区间, 中粗晶白云岩 Na 元素含量明显低于细晶白云岩 (图 9d), 说明成岩流体之间可能发生了变化, 早期白云岩化成岩流体主要为成烃流体, 后期可能有构造热流体的加入。白云岩中 Fe 和 Mn 元素含量的变化也反映了两期白云岩化成因的特点。细晶白云岩 Fe 和 Mn 元素的含量明显低于中-粗晶白云岩, 在细晶白云岩中 Fe 和 Mn 元素含量分别介于 $1193 \times 10^{-6} \sim 2385 \times 10^{-6}$ 、 $119.2 \times 10^{-6} \sim 229.5 \times 10^{-6}$ 之间, 而中-粗晶白云岩中 Fe 和 Mn 元素含量分别介于 $4145 \times 10^{-6} \sim 4325 \times 10^{-6}$ 、 $425.2 \times 10^{-6} \sim 491.2 \times 10^{-6}$ 之间, Fe 和 Mn 元素含量的增加预示着其形成环境的还原性增强。同时, 中粗晶白云岩 Fe 和 Mn 元素含量与细晶白云岩相比具有变大的趋势, 说明中-粗晶白云岩为细晶白云岩进一步交代云化的结果。

表 3 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩全量与微量元素统计表

Table 3 Statistical table of total and trace elements of Ordovician dolomite in the western margin of Ordos Basin

序号	岩性	深度 m	Mn $\times 10^{-6}$	Fe $\times 10^{-6}$	Sr $\times 10^{-6}$	Na $\times 10^{-6}$	序号	岩性	深度 m	Mn $\times 10^{-6}$	Fe $\times 10^{-6}$	Sr $\times 10^{-6}$	Na $\times 10^{-6}$
1	中粗晶白云岩	4830.13	435.5	4412	28.85	165.5	16	细晶白云岩	4832.73	139.5	1560	60.23	289.9
2	细晶白云岩	4830.26	229.5	2385	50.65	155.5	17	细晶白云岩	4832.85	145.6	1685	58.69	294.1
3	中粗晶白云岩	4830.39	491.2	4325	26.25	173.6	18	细晶白云岩	4833.02	220.3	2544	52.53	303.8
4	细晶白云岩	4830.54	123.6	1134	60.30	238.9	19	细晶白云岩	4833.33	185.1	2235	53.33	310.2
5	中粗晶白云岩	4830.65	425.2	4145	22.40	240.4	20	细晶白云岩	4833.5	147.4	1542	61.84	310.8
6	细晶白云岩	4830.88	174.2	1573	60.70	241.6	21	细晶白云岩	4833.65	148.2	1588	62.85	312.2
7	细晶白云岩	4831.08	119.2	1193	70.22	242.7	22	细晶白云岩	4833.79	163.0	1691	60.00	314.6
8	细晶白云岩	4831.25	186.3	2363	55.55	245.8	23	细晶白云岩	4833.92	147.0	1689	61.78	332.2
9	细晶白云岩	4831.48	181.6	1746	56.53	247.8	24	细晶白云岩	4834.04	119.8	1245	70.19	339.7
10	细晶白云岩	4831.6	140.0	1342	60.28	248.5	25	细晶白云岩	4834.15	120.3	1085	74.65	342.5
11	细晶白云岩	4831.75	139.5	1368	62.45	254.5	26	细晶白云岩	4834.24	123.5	1286	65.25	345.2
12	细晶白云岩	4831.92	139.8	1362	62.86	257.6	27	细晶白云岩	4834.4	140.1	1371	61.74	346.5
13	细晶白云岩	4832.04	145.1	1314	58.77	272.5	28	细晶白云岩	4834.6	142.8	1385	62.45	348.6
14	细晶白云岩	4832.25	148.2	1328	59.69	275.8	29	细晶白云岩	4834.75	144.6	1375	60.28	349.4
15	细晶白云岩	4832.53	162.6	2000	55.45	286.0	30	细晶白云岩	4835	119.6	1221	70.68	356.6

3.1.6 锶同位素

海相碳酸盐岩锶同位素主要存在地壳来源的壳源锶、地幔来源的幔源锶和同期海水来源的海源锶 3 种, 通过白云岩中锶同位素的变化能够有效的示踪成岩流体的来源 (朱光有和李茜, 2023)。壳源 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 含量较高, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 含量较高, 全球平均值为 0.7119; 幔源锶是大洋中脊热液系统向海水提供的相对贫放射成因的锶, ^{87}Sr 含量较低, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低, 全球平均值 0.7035; 海源锶与同期海水和海相沉积物相似。当白云岩中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比同期保存完好的灰岩高 10^{-4} 以上时, 白云岩成因或者成岩可能受携带壳源 Sr 的流体的影响 (王利超等, 2016)。

西探 1 井奥陶系克里摩里组 5 个中粗晶白云岩锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 0.710218-0.710818 之间, 平均 0.7106。与西探 1 井相邻的青龙山剖面奥陶系克里摩里组灰岩 5 个样品锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 0.708384-0.708553 之间, 平均值 0.7085 (表 4)。灰岩锶同位素值相当于奥陶系克里摩里组正常海水的锶同位素值, 中

粗晶白云岩锶同位素值明显接近于壳源锶同位素的平均值，白云岩中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比同期保存完好的灰岩高达 0.0021，白云岩成因可能受到了同期构造携带的壳源锶的影响，具有后期改造热液白云岩成因的特点。

表 4 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组灰岩与白云岩锶同位素测试结果统计表

Table 4 Statistics of Strontium Isotope Test Results of Limestone and Dolomite in the Kelimoli Formation of the Ordovician, Western Margin of the Ordos Basin

样品编号	剖面/钻井	层位	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	误差 (M)
Q-1	青龙山	克里摩里组	灰岩	0.708553	0.000005
Q-2	青龙山	克里摩里组	灰岩	0.708543	0.000005
Q-3	青龙山	克里摩里组	灰岩	0.708428	0.000005
Q-4	青龙山	克里摩里组	灰岩	0.708394	0.000005
Q-5	青龙山	克里摩里组	灰岩	0.708384	0.000005
X-1	西探 1	克里摩里组	中粗晶白云岩	0.710218	0.000005
X-2	西探 1	克里摩里组	中粗晶白云岩	0.710748	0.000005
X-3	西探 1	克里摩里组	中粗晶白云岩	0.710466	0.000005
X-4	西探 1	克里摩里组	中粗晶白云岩	0.710818	0.000005
X-5	西探 1	克里摩里组	中粗晶白云岩	0.710717	0.000005

3.2 白云岩化模式

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩的形成是沉积环境和构造活动共同作用的结果，沉积作用奠定了白云岩形成的物质基础，构造活动引起了深部热流体的叠加改造，促进了白云岩的形成。浅海相沉积环境是白云岩形成的重要场所之一，浅海区域水体相对较浅，阳光充足，生物活动较为活跃，丰富的生物残骸和分泌物为白云岩的形成提供了物质基础（邵东波等，2019；周进高等，2020；于洲等，2021）。构造多期活动对白云岩形成也起着重要的控制作用，虽然鄂尔多斯盆地在奥陶纪时期相对稳定，但后期却受到了多期构造运动的叠加改造，局部的构造活动会导致地层的升降和断裂的产生，这些构造变动会改变地下水的流动路径和水动力条件，从而影响白云石化作用的发生和发展（曹自成等，2020；何溥为等，2021；杨朝屹等，2024；王丹，2024）。

3.2.1 白云岩发育的沉积基础

鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组高能滩沉积是该区古地理演化和油气储层研究的重要对象。克里摩里组高能滩沉积以台地边缘斜坡相为主，微地貌地形高差显著，为高能滩的发育提供了古地貌基础（周进高等，2020；于洲等，2021）。高能滩的岩性以泥亮晶粉砂屑灰岩、生屑碎屑灰岩为典型特征，受后期多期成岩作用的叠加改造，生物碎屑往往保存不完整，主要残存的生物碎屑包括腕足类、腹足类和三叶虫类，这些残存的生物碎屑证明了白云岩化作用奠基于早期的生物碎屑高能滩（图 9）。鄂尔多斯西缘奥陶系克里摩里组台地边缘带发育的高能滩沉积往往与相邻的灰质洼地相伴生，通过地震资料综合分析，主要是受到了奥陶纪沉积时期发育于台地边缘的系列同沉积断裂控制。由于继承了早期的裂谷沉积体系，在台缘斜坡带往往发育一系列近南北向的地堑和地垒带，在同沉积断裂控制的地垒带，水体相对清浅，又存在短暂的水体下降期，局部台地边缘相暴露，波浪频繁作用，有利于粗粒生物碎屑的富集，为后期白云岩的形成奠定了良好的物质基础（图 10，图 11a）。而在同沉积断裂控制的地堑带，水体相对较深，水动力条件相对较弱，高部位被淘洗的细粒物质又在该部位沉积，发育了以泥质灰岩为主的灰质洼地，不利于后期成岩作用的改造（图 11a）。因此，鄂尔多斯西缘奥陶纪沉积时期，在台地边缘带发育的系列同沉积断裂控制了沉积相带和岩性的发育空间，进一步决定了后期白云岩改造的物质空间，从物质基础上就表现出了沿着断裂带发育空间的不均质性（图 11）。

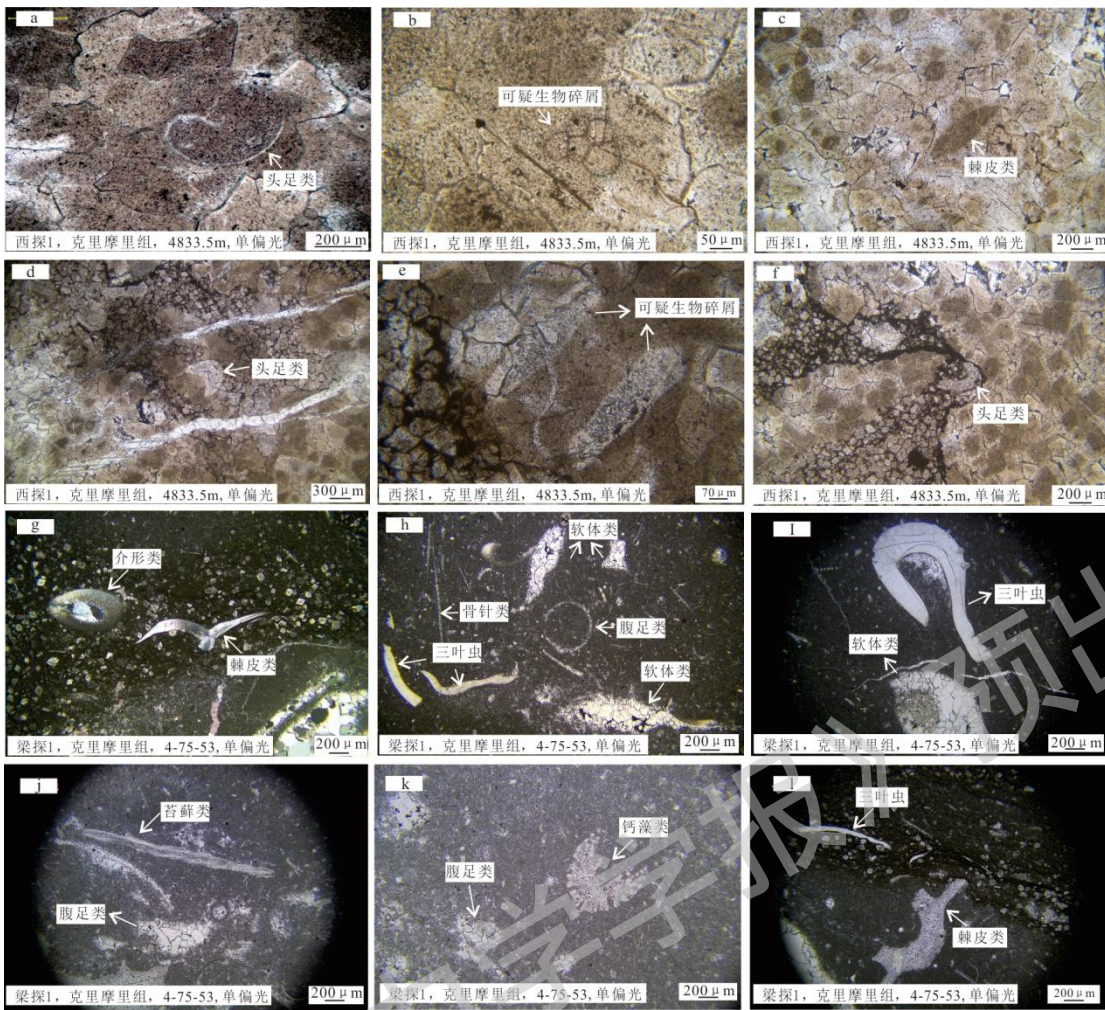


图9 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组生物碎屑灰岩典型照片

Fig.9 Typical photo of bioclastic limestone from the Krimoli Formation of the Ordovician in the western margin of the Ordos Basin

3.2.2 白云岩形成与改造

石炭纪至三叠纪末期，鄂尔多斯盆地西缘沉积相对稳定，构造活动微弱，受沉积压实作用的影响，奥陶系克里摩里组高能滩沉积局部被白云岩化，岩性以发育细晶白云岩为主（图 12b,c）。中生代晚侏罗世时期，受燕山运动主幕古太平洋板块俯冲远程效应的影响，华北克拉通西部发生了强烈的挤压构造变形作用，在鄂尔多斯盆地周缘普遍发育了侏罗系与白垩系之间的角度不整合以及典型的逆冲推覆构造带，如盆地东部的鹅毛口逆冲推覆构造带、盆地北部大青山逆冲推覆构造带以及盆地西部的贺兰山逆冲推覆构造带，这些逆冲推覆构造带多以卷入中侏罗世延安组或大同组含煤地层为标志层（张岳桥等，2006）。区域沉积特征的变化也响应了该期的构造活动，鄂尔多斯盆地早中侏罗世经历了一期完整的湖进至湖退的过程，中侏罗世直罗组沉积时期，区域上发育一套可以对比的厚层砂岩或含砾砂岩沉积，代表了晚侏罗世造山运动的开始，其发育时限大致为 168 Ma (Li et al.,2014;李振宏等，2015)。晚侏罗世，盆地西缘芬芳河组、北缘北缘大青山组，分别发育了一套厚层的磨拉石沉积，反应了周缘山系的快速抬升和物源区构造活动的突然加强，从沉积角度响应了晚侏罗世发生在鄂尔多斯周边的强烈的造山运动（李振宏等，2015）。构造热事件的研究成果也为中晚侏罗世构造事件的发生、发展过程提供了重要的依据，锆石裂变径迹数据表明在 165~141Ma 期间，鄂尔多斯盆地普遍发生了一期重要的构造隆升，与区域构造、沉积之间具有较好的耦合性（陈刚等，2007）。鄂尔多斯盆地西缘中段的横山堡后冲构造带和马家滩大型逆冲推覆构造带也在中晚侏罗世开始形成，这些构造带前缘的逆冲活动显著改变了盆地边缘先期存在的构造沉积格局。受浅层逆冲推覆断裂体系的影响，深部早期发育的控沉积断裂重新活动，这些深大断裂体系进一步沟通了深部的热流体，受深部热流体改造作用的影响，奥陶系克里摩里组白云岩大规模形成，以中粗晶白云岩为主（图 11d）。碳氧同位素恢复的中粗晶白云岩形成温度以及锶同位素示踪的壳源热流体都与这一时期的构造活动时限相匹配。

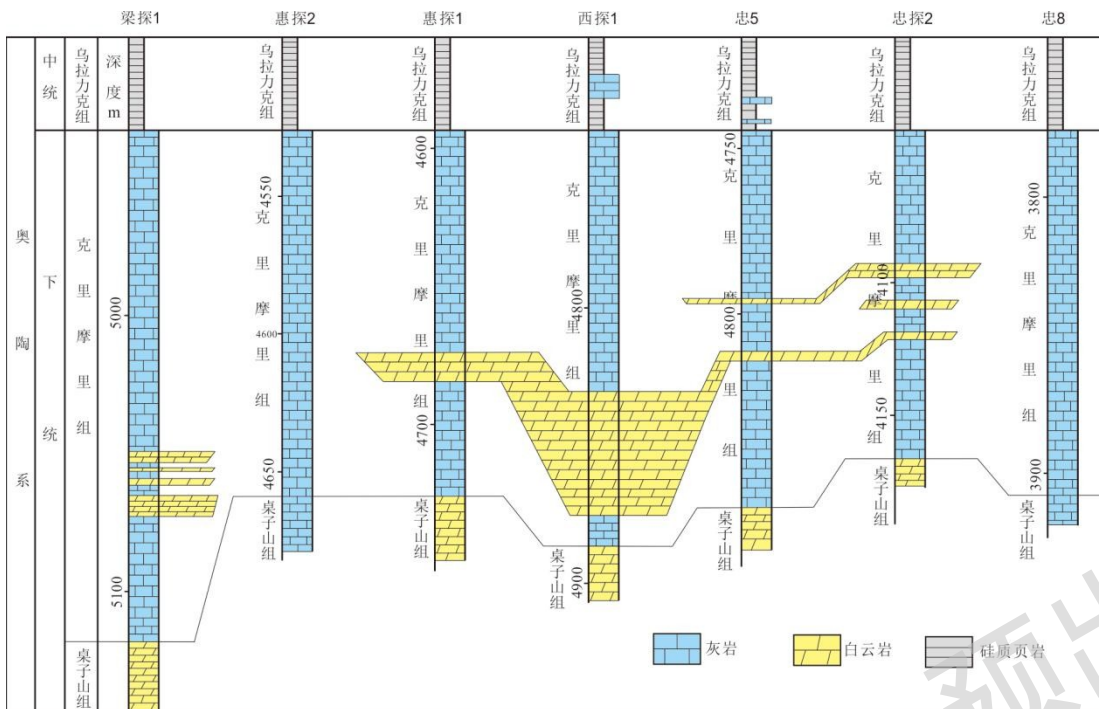


图 10 鄂尔多斯西缘奥陶系克里摩里组白云岩横向对比图
 Fig.10 Transverse comparison of the dolomites of the Ordovician Kermoli Formation in the western margin of Ordos

新生代时期，鄂尔多斯盆地西缘处于青藏高原向东北方向隆升扩展的最前缘，其构造活动与青藏高原隆升的远程效应息息相关（董晓朋等，2023；寇琳琳等，2024）。青藏高原东北缘弧形构造带新生代三期区域性的不整合面，包括古近系寺口子组与清水营组之间的角度不整合、新近系彰恩堡组与干河沟组之间的平行不整合以及早更新世玉门砾岩与下覆不同时代地层之间的角度不整合接触，分别代表了青藏高原隆升的远程效应在鄂尔多斯盆地西缘的响应（寇琳琳等，2021）。古近系寺口子组与清水营组之间的角度不整合接触关系仅仅发生六盘山以西的隆德地区，而在六盘山以东的香山-天景山断裂带、烟筒山断裂带以及牛首山断裂带弧形构造带的主体部位清水营组与彰恩堡组之间均为整合接触关系，说明在该时期青藏高原向东北方向的推挤作用还没有影响到弧形构造带六盘山以东地区，该期构造运动对于鄂尔多斯盆地西缘构造活动的影响相对较小（寇琳琳等，2021）。新近系彰恩堡组与上覆干河沟组之间的平行不整合面在青藏高原弧形构造带普遍发育，不整合接触面上可以见到明显的古风化壳，代表了青藏高原向东北方向的隆升扩展达到了高峰期（董晓朋等，2023）。青藏高原东北缘新生代红黏土的发育也指示了该期的区域构造抬升事件，基于古地磁数据和古生物组合研究，其底界年龄可以精确限定在 11~8 Ma（Li et al.,2013）。该期构造运动对鄂

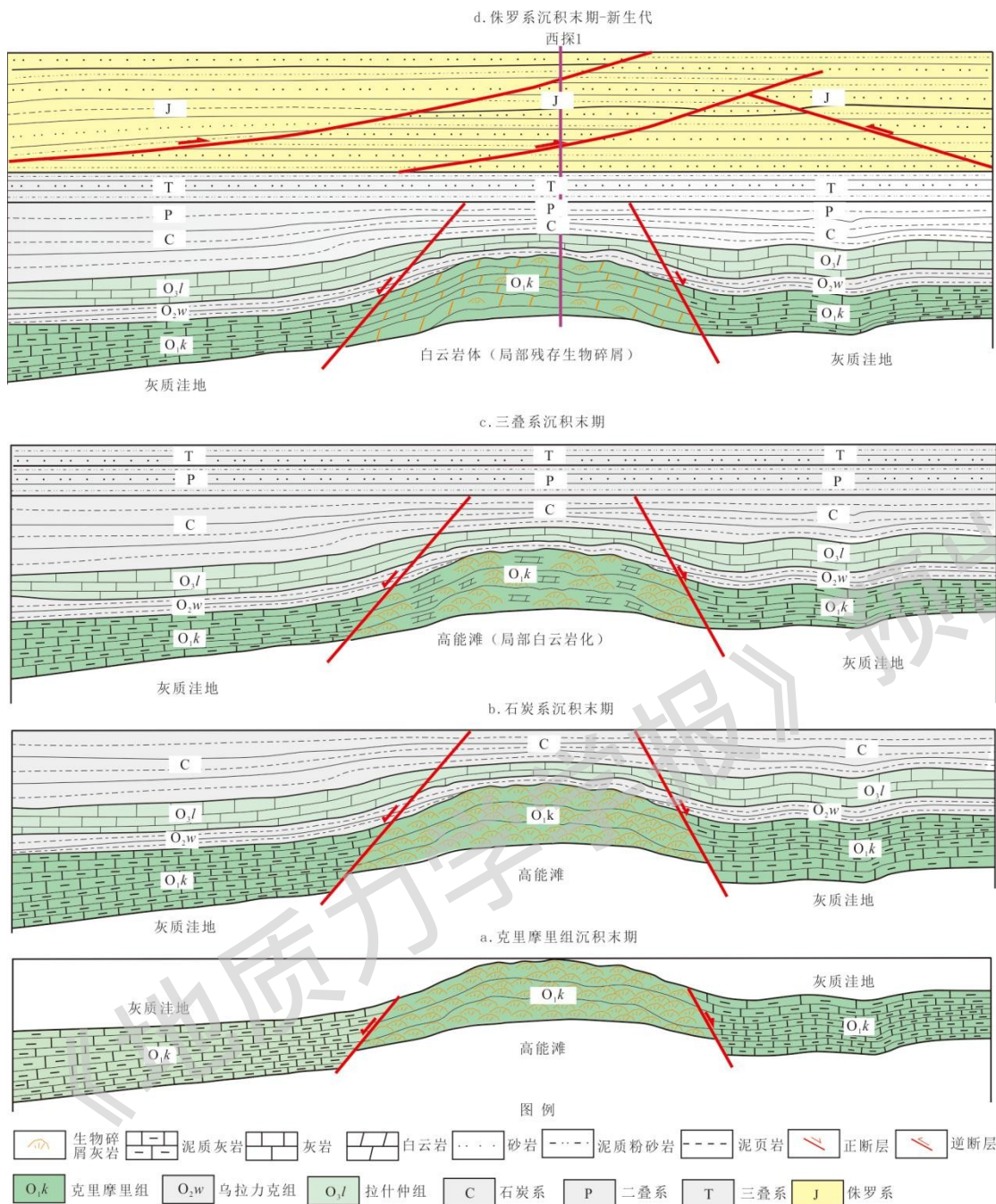


图 11 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系克里摩里组白云岩形成演化模式图

Fig.11 Evolution model diagram of the formation of dolomites of the Ordovician Cremori Formation in the western margin of the Ordos Basin

鄂尔多斯盆地西缘的构造活动影响较大，区域断裂重新活动，引起深部热流体沿着早期的深大断裂体系运移至早期的细-中粗晶白云岩，白云岩发生了进一步的交代作用，形成了一系列与热液活动相关的马鞍状白云石和自生石英，代表了青藏高原隆升远程效应引起了鄂尔多斯盆地西缘深部热流体和先期白云岩的重新交代，中粗粒的次生白云石进一步形成（图 11d）。早更新世玉门砾岩与下覆古近系-新近系不同层位之间的角度不整合接触，在青藏高原东北缘弧形构造带前缘的大罗山-牛首山地区以及弧形构造带后缘的海原断裂带附近都有分布，尤其在弧形构造带前缘的青铜峡一带最为典型。宇宙核素测年结果表明，玉门砾岩形成的底部年龄大约为 1.1Ma，区域上与玉门组砾岩下伏最新地层干河沟组沉积结束的古地磁年龄约为 3.0 Ma，可以确定该期构造事件大约发生于 2.77~1.1 Ma 期间（Shi et al.,2015）。该期构造活动可能引起奥陶系克里摩里组白云岩的进一步交代，孔洞充填白云岩呈现出明显的环带生长。

鄂尔多斯盆地西缘具有深浅两套断裂体系，深部断裂体系为一组同沉积正断裂体系，断层上断点均未断穿石炭系底部，浅部断裂体系为一套逆冲推覆断裂体系，卷入的最老地层为侏罗系，该套断裂体系形成于晚侏罗世，新生代持续活动（图 11）。深部正断裂体系断凹和断垒组成的隆凹相间的构造格局，控制了奥陶系克里摩里组沉积相带的展布，在断隆地带往往水体清浅，发育生物碎屑灰岩，而在断凹地带则发育一套泥质灰岩为主的沉积，位于断隆地带的生物碎屑灰岩奠定了后期白云岩化改造的基础。中生代，浅部逆冲推覆构造多期发育，具有幕式活动的特征，浅部逆冲推覆构造引起深部早期发育的正断裂体系重新活动，沟通了深部热流体，早期位于断隆高部位的生物碎屑灰岩进一步得到改造，交代形成白云岩，而位于早期断凹部位的泥质白云岩白云化程度较弱，或者基本上没有发生白云岩化。因此，鄂尔多斯西缘奥陶系克里摩里组白云岩的形成受控于深浅两套断裂体系，深部断裂体系控制了白云岩化形成的物质基础，浅部断裂体系的多期活动引起了深部热流体的向上运移，促进了生物碎屑灰岩交代形成白云岩。

4 结论

(1) 鄂尔多斯盆地西部奥陶系克里摩里组白云岩从岩性特征上具有细晶白云岩和中-粗晶白云岩两期，细晶白云岩形成于深埋藏期，中-粗晶白云岩具有深部热流体改造的特征，热流体具有明显的壳源特征，白云岩的发育明显受到了西部复杂构造断裂带活动的影响。

(2) 鄂尔多斯盆地西缘具有深部同沉积正断裂和浅部逆冲推覆两套断裂体系，深部正断裂体系断隆高部位控制了白云岩高能滩生物碎屑灰岩沉积相带的发育，而浅部逆冲推覆构造体系引起了深部断裂体系的重新活动，沟通了深部热流体，促进生物碎屑灰岩向白云岩化的多期叠加改造。

References

- AL-AASM I S, CROWE R, 2018. Fluid compartmentalization and dolomitization in the Cambrian and Ordovician successions of the Huron Domain, Michigan Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 92:160-178.
- BAO H P, YANG F, CAI Z H, et al., 2017. Origin and reservoir characteristics of Ordovician dolostones in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 37(1): 32-45. (in Chinese with English abstract)
- CAO Z, YOU D, QI L X, et al., 2020. New insights of the genesis of ultra-deep dolomite reservoirs in well TS1, Tarim Basin: Evidence from in situ carbon and oxygen isotope analysis[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(7): 915-922. (in Chinese with English abstract)
- CHEN G, SUN J, ZHOU L F, et al., 2007. Fission track age records of tectonic hot events in the western Ordos Basin[J]. *Science in China (D)*, 37(sup): 110-118. (in Chinese with English abstract)
- CHENG X P, LI P P, ZOU H Y, et al., 2013. Geochemical characteristic sand fluid origin of the Changxing Formation dolomitic rock in the Xinglongchang area of east Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(7):1031-1040. (in Chinese with English abstract)
- DAVIES G R, SMITH L B., 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1641-1690.
- DONG X P, LI Z H, JING X H, et al., 2023. Stratigraphic sequence characteristics and geochronology research progress of the Cenozoic in the arcuate tectonic belt on the northeastern margin of the Tibet Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 29(4): 465-484. (in Chinese with English abstract)
- DI G D, CHEN Y J, CHEN K, et al., 2024. Distribution and activity of strike-slip faults in Gaoshiti area of Sichuan Basin and their control and significance for the development of dolomite reservoirs in Permian Qixia Formation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 45(12):1761-1782. (in Chinese with English abstract)
- FU J H, ZHENG C B. 2001. Evolution Between North China Sea and Qilian Sea of the Ordovician and the Characteristics of Lithofacies Palaeogeography in Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 3(4): 25-33. (in Chinese with English abstract)
- GARAGULY I, VARGA A, RAUCSIK B, 2018. Pervasive early diagenetic dolomitization, subsequent hydrothermal alteration, and Late stage hydrocarbon accumulation in a Middle Triassic carbonate sequence (Szeged Basin, SE Hungary)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 98:270-290.
- GUO Y R, ZHAO Z Y, XU W L, et al., 2014. Sequence Stratigraphy of the Ordovician System in the Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(1): 44-60. (in Chinese with English abstract)
- HE F Q, WANG F B, GUO L G, et al., 2022. Evolution of Prototype Basin and Change of Tectonic-sedimentary Pattern in Paleozoic, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3): 373-384. (in Chinese with English abstract)
- HE P W, XU W, ZHANG L J, et al., 2021. Characteristics and genetic mechanism of Qixia Formation dolomite in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(6):1532-1545. (in Chinese with English abstract)
- HIRD, 1987. The composition of carbonate and oxygen isotope in the ancient dolomite [J]. *AAPG Bulletin*, 34(4): 156-232.
- KACZMAREK S E, SIBLEY D F, 2011. On the evolution of dolomite stoichiometry and cation order during high-temperature synthesis experiments: an alternative model for the geochemical evolution of natural dolomites [J]. *Sedimentary Geology*, 240(1/2):30-40.
- KOU L L, LI Z H, DONG X P, et al., 2021. The age sequence of the detrital zircons from the Guanyindian section in Longde, the northeastern margin of the Tibetan Plateau, and its geological significance [J]. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 1051-1064. (in Chinese with English abstract)
- KOU L L, LI Z H, XIA C X., 2024. Formation and evolution of the Yuncheng Salt Lake and sources of the saline ions [J]. *Journal of Geomechanics*, 30(6): 933-951. (in Chinese with English abstract)
- LI D, LING H F, JIANG S Y, et al., 2009. New Carbon Isotope Stratigraphy of the Ediacaran-Cambrian Boundary Interval from SW China: Implications for Global Correlation [J]. *Geological Magazine*, 146(4): 465-484. (in Chinese with English abstract)
- LI R B, DUAN J B, PAN L, et al., 2021. Genetic mechanism and main controlling factors of the Middle Permian Maokou Formation dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 32(9): 1347-1357. (in Chinese with English abstract)
- LI W H, ZHANG Q, LI K Y, et al., 2021. Sedimentary Evolution of the Late Paleozoic in Ordos Basin and Its Adjacent Areas [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(1): 39-52. (in Chinese with English abstract)
- LI W Q, LIU H C, LI P P, et al., 2023. Diverse Fluids in Dolomitization and Petrogenesis of the Dengying Formation Dolomite in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Earth Science*, 48(9): 3360-3377. (in Chinese with English abstract)
- LI YANG, LI X G, CHEN C, et al., 2024. Factors Influencing Cathodoluminescence in Carbonate Minerals: A Case Study from the Lower and Middle Ordovician of

- the Southern Margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*<https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.112>. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, SONG Y G, QIAN L B, et al., 2013. Paleomagnetic and fission-track dating of a Late Cenozoic red earth section in the Liupan Shan and associated tectonic implications[J]. *Journal of Earth Science*, 24(4):506-518. (in Chinese with English abstract)
- LI Z H, DONG S W, QU H J. 2014. Timing of the initiation of the Jurassic Yanshan movement on the North China Craton: evidence from sedimentary cycles, heavy minerals, geochemistry, and zircon U–Pb geochronology[J]. *International Geology Review*, 56 (3) : 288-312.
- LI Z H, XU L M, LIU X S, et al., 2015. Critical Timing of Sedimentary Filling Records of Ordovician and Its Tectonic Significance on the Southern Ordos Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 50(2): 428-445. (in Chinese with English abstract)
- LI Z H, DONG S W, FENG S B, et al., 2015. Sedimentary Response to Middle–Late Jurassic Tectonic Events in the Ordos Basin. *Acta Geoscientia Sinica*, 36 (1) : 22-30. (in Chinese with English abstract)
- LIAO H H, SU Z T, HUANG W M, et al., 2022. Origin of porphyry dolomite in the 5th sub-member of the 5th member of Ordovician Majiagou Formation (M55 sub-member), Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 44 (5) : 835-844. (in Chinese with English abstract)
- LIU J Q, LING J S, FENG W M, et al., 2014. The REE geochemical characteristics of middle-upper Cambrian dolomite in southeast Sichuan basin and its significance [J]. *Mineral Petrology*, 2014, 34(1) : 87-94. (in Chinese with English abstract)
- LUKOCZKI G, HAAS J, GREGG J M, et al., 2019. Multi-phase dolomitization and recrystallization of Middle Triassic shallow marine-peritidal carbonates from the Mecsek Mts. (SW Hungary), as inferred from petrography, carbon, oxygen, strontium and Clumped isotope data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 101:440-458.
- NGIA N R, HU Mingyi, GAO Da, 2019. Tectonic and geothermal controls on dolomitization and dolomitizing fluid flows in the Cambrian–Low-er Ordovician carbonate successions in the western and central Tarim Basin, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 172:359-382.
- NOTHDURFT L D, WEBB G E, KAMBER B S, 2004. Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Wesren Australia: Confirmation of seawater REE proxy in ancient limestone [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 263-283.
- QIANG S T, SHEN P, ZHANG J, XIA M L, et al., 2017. The Evolution of Carbonate Sediment Diagenesis and Pore Fluid in Dengying Formation, Central Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(4): 797-811. (in Chinese with English abstract)
- REN Z L, QI K, LI J B, et al., 2021. Thermodynamic evolution and hydrocarbon accumulation in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 42 (5) : 1030-1042. (in Chinese with English abstract)
- REN Y, ZHONG D K, GAO C L, et al., 2016. Geochemical characteristics, genesis and hydrocarbon significance of dolomite in the Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37 (9) : 1102-1115. (in Chinese with English abstract)
- SHAO D B, BAO H P, WEI L B, et al., 2019. Tectonic palaeo-geography evolution and sedimentary filling characteristics of the Ordovician in the Ordos area [J]. *Journal of Palaeogeography*, 21 (4) : 537-556. (in Chinese with English abstract)
- SHAO L Y, 1994. The relation of the Oxygen and Carbon isotope in the carbonate rocks to the Paleotemperature etc. *Journal of China University of Mining & Technology*, 23 (1) : 39-45. (in Chinese with English abstract)
- SHAO L Y, ZHANG P F, DOU J W, et al., 1996. Paleogeographic significances of carbon and oxygen isotopes in late Permian rocks of southwest China. *Geochimica*, 25(6):575-581. (in Chinese with English abstract)
- SHI W, HU J M, CHEN H, et al., 2015. Cenozoic Tectonic Evolution of the Arcuate Structures in the Northeast Tibetan Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 676-677. (in Chinese with English abstract)
- SU Z T, ZHANG L W, LI J J, et al., 2017. Characteristics of Fluid Inclusions in Dolomite of the Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin and Their Significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36 (5) : 843-849. (in Chinese with English abstract)
- WANG D, 2024. Geochemical Characteristics and Origins of the Cambrian–Ordovician Dolomites in Northern and Central Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42 (3) : 857-876. (in Chinese with English abstract)
- WANG L C, HU W X, WANG X L, et al., 2014. Seawater normalized REE patterns of dolomites in Geshan and Panlongdong sections, China: Implications for tracing dolomitization and diagenetic fluids [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 56: 63-73. WANG L C, HU W X, WANG X L, et al., 2016. Variation of Sr content and 87 Sr / 86 Sr isotope fractionation during dolomitization and their implications. *Oil & Gas Geology*, 37 (4) : 464-470. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z T, ZHOU H R, WANG X L, et al., 2016. The Ordovician Basin Prototype in the Northwest Ordos Basin: Constraint from the Ordovician Sedimentary Respond in the Helan—Zhuozhi Mountains. *Geological Review*, 62 (4) : 1041-1060. (in Chinese with English abstract)
- WU D X, ZHOU J G, WU X N, et al., 2018. Lithofacies and Palaeogeography of the Early–Middle Ordovician in the Western Ordos Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 24 (5) : 747-760. (in Chinese with English abstract)
- WU D X, SUN L Y, ZHOU J G, et al., 2019. Characteristics and genesis of the Ordovician Kelimoli dolomite reservoirs in the western edge of the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 39 (6) : 51-62. (in Chinese with English abstract)
- WU F, LI Z H, JING X H, et al., 2024. Detrital zircon ages of the Permian coal bearing rock series in the Zhongtiao Mountain area and their sedimentological constraints on regional tectonic activity [J]. *Coal Geology & Exploration*, 52 (11) : 37-54. (in Chinese with English abstract)
- WU S Q, ZHU J Q, HU W X, et al., 2009. Rare earth element geochemistry characteristics of Cambrian–Ordovician dolostones in the Tarim basin and their implications for the origin [J]. *Geoscience*, 23(4) : 638-647. (in Chinese with English abstract)
- WU Y T, NING M, XIA P, et al., 2024. Research on dolomitization process in dolomite–evaporite syngenetic system of the Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2024, 26 (4) : 895-910. (in Chinese with English abstract)
- WU X N, WU D X, DING Z C, et al., 2020. Geochemical characteristics and genetic analysis of Ordovician dolomites in the western margin of Ordos Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25 (4) : 312-318. (in Chinese with English abstract)
- XI S L, YAN W, LIU X S, et al., 2024. New fields, new types and resource potentials of natural gas exploration in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1):33-51, 132. (in Chinese with English abstract)
- YAMAMOTO K, OTTINGER G, ALZINATI O, 2018. Geochemical, petrographical, and petrophysical evaluations of a heterogeneous, stratiform dolomite from a Barremian oil field, offshore Abu Dhabi (United Arab Emirates) [J]. *AAPG Bulletin*, 102(1):129-152.
- YAN W, JIN Z K, YAO M Z, et al., 2018. Identification and formation mechanisms of hydrothermal dolomite in the Lower Paleozoic, Jizhong depression [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 3(4):376-389. (in Chinese with English abstract)
- YANG C Y, XIA Q S, YANG P, et al., 2024. Analysis of Diagenetic Fluid Characteristics and Reconstruction of Composite Diagenetic Environments in the Middle Permian Dolomites of the Western–Northern Sichuan Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.021>. (in Chinese with English abstract)
- YANG X Y, BAO H P, REN J F, et al., 2015. Types of dolomites and characteristics of stable isotope from the Ma55 sub-member of Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26 (4) : 650-656. (in Chinese with English abstract)
- YU C Y, JIA Y M, REN Z L, et al., 2021. Geochemical characteristics and genesis of the Ma55 dolomite of Ordovician Majiagou Formation in Daniudi area, Ordos Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 26 (4) : 375-383. (in Chinese with English abstract)
- YU X Y, LI P P, ZOU H Y, et al., 2015. Rare earth element geochemistry of dolostones and its indicative significance of the Permian Changxing Formation in Yuanba Gasfield, northern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 17 (3) : 309-320. (in Chinese with English abstract)
- YU Z, LUO X R, ZHOU J G, et al., 2024. Development characteristics and genetic mechanisms of high-quality dolomite reservoirs in the 4th Member of Ordovician Majiagou Formation in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 44(2): 30-39. (in Chinese with English abstract)
- YU Z, ZHOU J G, LI C S, et al., 2021. Tectonic–lithofacies paleogeographic characteristics of Ordovician Kelimoli and Wulalike stages in the western edge of Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 32 (6) : 816-825. (in Chinese with English abstract)

- ZHAI M G. 2021. Ordos Block (Basin) Is A Key to Understand Early Continental Evolution and Tectonic Regime of the North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin, 66(26): 3441-3461. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y H, HE D F, KAI B Z. 2024. Tectonic-depositional Environment and Prototype Basin Evolution of Middle-Late Permian in Ordos Basin and Adjacent Areas [J]. Lithologic Reservoirs, 36(1): 32-44.
- ZHAO W W, WANG B Q. 2011. Geochemical characteristics of dolomite from 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in Sulige area, Ordos Basin [J]. Acta Geoscientia Sinica, 32(6):681-690. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO W Z, SHEN A J, HU S Y, et al., 2012. Types and distributional features of Cambrian-Ordovician dolostone reservoirs in Tarim Basin, northwestern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 28(3):758-768. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Z Y, SUN Y S, LI C S, et al., 2015. Stratigraphic Division and Correlation of Ordovician System in Ordos Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 22(5): 9-17, 151.
- ZHOU Y, YANG F L, JI Y L, et al., 2020. Characteristics and Controlling Factors of Dolomite Karst Reservoirs of the Sinian Dengying Formation, Central Sichuan Basin, Southwestern China. Precambrian Research, 343: 105708.
- ZHOU J G, XI S L, DENG H Y, et al., 2020. Tectonic-lithofacies paleogeographic characteristics of Cambrian-Ordovician deep marine carbonate rocks in the Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 40 (2) :41-53. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, SHI W, LIAO C Z, et al., 2006. Fault kinematic analysis and change in late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos basin, North China [J]. Acta Geologica Sinica, 80(5): 639-647. (in Chinese with English abstract)
- ZHU G Y, LI Q. 2023. Progress in genetic types and research methods of dolomite. Acta Petrologica Sinica, 44 (7) : 1167-1190. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 包洪平, 杨帆, 蔡郑红, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩成因及白云岩储层发育特征[J]. 天然气工业, 37(1): 32-45.
- 曹自成, 尤东华, 漆立新, 等, 2020. 塔里木盆地塔深1井超深层白云岩储层成因新认识:来自原位碳氧同位素分析的证据[J]. 天然气地球科学, 31(7): 915~922.
- 陈刚, 孙建博, 周立发, 2007. 鄂尔多斯盆地西南缘构造热事件的裂变径迹年龄记录[J]. 中国科学(D), 37(增刊): 110-118.
- 成晓曦, 李平平, 邹华耀, 等, 2013. 川东兴隆场地区长兴组白云岩地球化学特征及流体来源[J]. 地质学报, 87(7):1031-1040.
- 董晓朋, 李振宏, 井向辉, 等, 2023. 青藏高原东北缘弧形构造带新生代地层沉积序列及年代学研究进展[J]. 地质力学学报, 29(4): 465-484.
- 狄贵东, 陈亚军, 陈康, 等, 2024. 四川盆地高石梯地区走滑断裂的分布及活动对二叠系栖霞组白云岩储层发育的控制作用与意义[J]. 石油学报, 45(12):1761-1782.
- 付金华, 郑聪斌, 2001. 鄂尔多斯盆地奥陶纪北海和祁连海演变及岩相古地理特征[J]. 古地理学报, 3(4): 25-33.
- 郭彦如, 赵振宇, 徐旺林, 等, 2014. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架[J]. 沉积学报, 32(1): 44-60.
- 何发岐, 王付斌, 郭利果, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地古生代原型盆地演化与构造沉积格局变迁[J]. 石油实验地质, 44(3):373-384.
- 何溥为, 胥旺, 张连进, 等, 2021. 川中磨溪-高石梯地区栖霞组白云岩特征及成因机制[J]. 沉积学报, 39(6):1532-1545.
- 寇琳琳, 李振宏, 董晓朋, 等, 2021. 青藏高原东北缘隆德观音店剖面碎屑锆石年龄序列及地质意义[J]. 地质力学学报, 27(6): 1051-1064.
- 寇琳琳, 李振宏, 夏彩香, 等, 2024. 运城盐湖形成演化与盐离子来源[J]. 地质力学学报, 30(6): 933-951.
- 刘建清, 林家善, 冯伟明, 等, 2014. 四川盆地东南缘中上寒武统白云岩稀土元素特征及成因意义—以贵州毕节长树田剖面为例 [J]. 矿物岩石, 34(1): 87-94.
- 李让彬, 段金宝, 潘磊, 等, 2021. 川东地区中二叠统茅口期白云岩储层成因机理及主控因素 [J]. 天然气地球科学, 32(9): 1347-1357.
- 李文奇, 刘汇川, 李平平, 等, 2023. 四川灯影组白云岩流体多样化特征及白云岩差异性成因 [J]. 地球科学, 48(9): 3360-3377.
- 李文厚, 张倩, 李克永, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. 古地理学报, 23(1): 39-52.
- 李振宏, 徐黎明, 刘新社, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶纪沉积充填记录的关键时限及其构造意义[J]. 地质科学, 50(2): 428-445.
- 李振宏, 董树文, 冯胜斌, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地中一晚侏罗世构造事件的沉积响应[J]. 地球学报, 36(1): 22-30.
- 李阳, 李晓光, 陈昌, 等, 2024. 碳酸盐矿物阴极发光影响因素研究—以鄂尔多斯盆地南缘奥陶系中下统为例[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.112>
- 廖慧鸿, 苏中堂, 黄文明, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段5亚段斑化白云岩成因[J]. 石油实验地质, 44(5): 835-844.
- 强深涛, 沈平, 张健, 等, 2017. 四川盆地川中地区震旦系灯影组碳酸盐沉积物成岩作用与孔隙流体演化. 沉积学报, 35(4):797-811.
- 任影, 钟大康, 高崇龙, 等, 2016. 川东寒武系龙王庙组白云岩地球化学特征、成因及油气意义[J]. 石油学报, 37(9): 1102-1115.
- 任战利, 祁凯, 李进步, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地热动力演化史及其对油气成藏与富集的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 42(5): 1030-1042.
- 邵东波, 包洪平, 魏柳斌, 等, 2019. 鄂尔多斯地区奥陶纪构造古地理演化与沉积充填特征[J]. 古地理学报, 21(4): 537-556.
- 邵龙义, 1994. 碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系. 中国矿业大学学报, 23(1): 39-45.
- 邵龙义, 张鹏飞, 龚建伟, 等, 1996. 西南地区晚二叠世氧碳稳定同位素的古地理意义. 地球化学, 25(6):575-581.
- 苏中堂, 张丽雯, 李娟娟, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组白云岩包裹体特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 843-849.
- 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地西缘北部奥陶纪盆地原型:来自贺兰山和桌子山地区奥陶系的沉积响应[J]. 地质评论, 62(4): 1041-1060.
- 王丹, 2024. 塔北、塔中地区寒武系—奥陶系白云岩多成因模式[J]. 沉积学报, 42(3): 857-876.
- 王利超, 胡文瑄, 王小林, 等, 2016. 白云岩化过程中锶含量变化及锶同位素分馏特征与意义[J]. 石油与天然气地质, 37(4): 464-470.
- 吴东旭, 孙六一, 周进高, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地西缘克里摩里组白云岩储层特征及成因 [J]. 天然气工业, 39(6): 51-62.
- 吴东旭, 周进高, 吴兴宁, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地西缘早中奥陶世岩相古地理研究[J]. 高校地质学报, 24(5): 747-760.
- 吴芳, 李振宏, 井向辉, 等, 2024. 中条山地区二叠系含煤岩系碎屑锆石年龄及其对区域构造活动的沉积学制约[J]. 煤田地质与勘探, 52(11): 37-54.
- 吴仕强, 朱井泉, 胡文瑄, 等, 2009. 塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩稀土元素特征及其成因意义 [J]. 现代地质, 23(4): 638-647.
- 吴兴宁, 吴东旭, 丁振纯, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系白云岩地球化学特征及成因分析. 海相油气地质, 25(4): 312-318.
- 吴宇婷, 甯濛, 夏攀, 等, 2024. 白云岩-蒸发岩共生体系白云石化过程研究:以鄂尔多斯盆地马家沟组为例. 古地理学报, 26(4): 895-910.
- 席胜利, 闫伟, 刘新社, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 45(1): 33-51, 132.
- 闫伟, 金振奎, 姚梦竹, 等, 2018. 冀中拗陷下古生界热液白云岩的识别和形成机制[J]. 石油科学通报, 3(4):376-389.
- 杨西燕, 包洪平, 任军峰, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地马家沟组马五5亚段白云岩类型及稳定同位素特征[J]. 天然气地球科学, 26(4): 650-656.
- 杨朝屹, 夏青松, 杨鹏, 等, 2024. 川西—川北地区中二叠统白云岩成岩流体特征分析及复合成岩环境重建[J/OL]. 沉积学报, <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.021>
- 于洲, 罗晓容, 周进高, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段优质白云岩储层发育特征及成因机制[J]. 天然气工业, 44(2): 30-39.
- 余新亚, 李平平, 邹华耀, 等, 2015. 川北元坝气田二叠系长兴组白云岩稀土元素地球化学特征及其指示意义[J]. 古地理学报, 17(3): 309-320.
- 于春勇, 贾雨萌, 任战利, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地大牛地地区奥陶系亚段白云岩地球化学特征及成因[J]. 海相油气地质, 26(4): 375-383.
- 于洲, 周进高, 李程善, 等, 2021. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶纪克里摩里—乌拉拉克期构造—岩相古地理特征 [J]. 天然气地球科学, 32(6): 816-825.
- 翟明国, 2021. 鄂尔多斯地块是破解华北早期大陆形成演化和构造体制谜团的钥匙[J]. 科学通报, 66(26): 3441-3461.
- 翟明国, 何登发, 开百洋, 2024. 鄂尔多斯盆地及邻区中一晚二叠世构造—沉积环境与原型盆地演化[J]. 岩性油气藏, 36(1): 32-44.
- 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等, 2012. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J]. 岩石学报, 28(3):758-768.
- 赵振宇, 孙远实, 李程善, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地奥陶系地层划分与对比研究[J]. 特种油气藏, 22(5): 9-17, 151.
- 张岳桥, 施炜, 廖昌珍, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换[J]. 地质学报, 80(5): 639-647.
- 周进高, 席胜利, 邓红婴, 等, 2020. 鄂尔多斯盆地寒武系—奥陶系深层海相碳酸盐岩构造—岩相古地理特征 [J]. 天然气工业, 40(2): 41-53.

朱光有,李茜.2023.白云岩成因类型与研究方法进展.石油学报, 44(7): 1167-1190.

《地质力学学报》预出版